



JAEA-Research

2007-038



JP0750175

大量ナトリウムの安定化処理に関する技術開発

—ナトリウム転換の手法と基礎特性—

Development of Sodium Conversion Technology

- Method and Basic Features of Sodium Conversion Process -

松本 寿之 吉田 英一 鈴木 重哲* 安 智久*

Toshiyuki MATSUMOTO, Eiichi YOSHIDA, Shigeaki SUZUKI* and Tomohisa YASU*

大洗研究開発センター

技術開発部

Technology Development Department
Oarai Research and Development Center

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

大量ナトリウムの安定化処理に関する技術開発 －ナトリウム転換の手法と基礎特性－

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター

技術開発部

松本 寿之※、吉田 英一、鈴木 重哲*、安 智久*

(2007年2月2日受理)

ナトリウムを冷却材とする高速炉プラントの廃止措置やウランなどの放射性核種を微量に含むナトリウムを使用した試験施設を解体する際に、放射性物質として取り扱うべき大量のナトリウムが発生すると考えられる。このようなナトリウムを放射性廃棄物として直接処分する技術・方法は、国内においてまだ確立していない。そのため、経済性や安全性等を考慮した処分技術の検討・評価を行うことを目的に基礎的な試験研究を実施した。

ナトリウムを処分する上で、まず活性の高い金属であるナトリウムを安定な物質に転換した後に処分する方法が考えられている。これまでに海外で先行例のある、ナトリウム-水反応によりナトリウムを水酸化ナトリウムに転換する手法を対象に、ナトリウム転換基礎試験装置を用いて試験を実施した。本試験では、液体ナトリウムを水酸化ナトリウム溶液中に注入し、水酸化ナトリウムに転換する際の水酸化ナトリウム溶液の濃度・温度などの影響を把握した。また、ナトリウム注入ノズルの閉塞防止やナトリウムの攪拌を目的として、高温の窒素ガスをアトマイジングガスとして水酸化ナトリウム中に吹き込むが、その流量をパラメータとした。注入ナトリウム温度 200°C、注入速度 10kg/h を一定とし、アトマイジングガス流量 60~100Nl/min、水酸化ナトリウム温度 70~100°C、水酸化ナトリウム濃度 40~60wt% の範囲で、ナトリウム転換処理に与える影響を評価した。試験の結果、アトマイジングガス流量を増やすことによりナトリウムの注入量が安定するとともに、反応領域を広げる効果が得られた。水酸化ナトリウム温度による影響は顕著ではなかったが、70°Cを下回る温度ではナトリウム注入ノズルが閉塞する傾向が見られた。一方で水酸化ナトリウム濃度は低いほどナトリウム-水反応による水酸化ナトリウムの温度変動は大きくなり、その反応領域は広くなった。上記全ての試験条件において、未反応のナトリウムが突然反応を起こすなど急激な変動現象は見られず、安定したナトリウム転換処理が行なえることを確認した。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

※：技術開発協力員

*：常陽産業株式会社

Development of Sodium Conversion Technology

— Method and Basic Features of Sodium Conversion Process —

Toshiyuki MATSUMOTO[※], Eiichi YOSHIDA, Shigeaki SUZUKI^{*} and Tomohisa YASU^{*}

Technology Development Department
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 2, 2007)

Decommissioning of a sodium cooled fast reactor or an experimental facility which used radioactive sodium will bring a lot of radioactive sodium. However, technology to deal with such the radioactive sodium and decommission is not well established in Japan. Then, basic experimental study has been carried out in order to find and estimate an economic and safety process of the radioactive sodium decommission.

Sodium is so active, that it is proposed to convert the sodium to more stable chemicals before the decommission. There were some examples in overseas to convert the sodium into sodium hydroxide via sodium-water reaction. This method was examined by a basic sodium conversion test apparatus. In the experiment, liquid metal sodium was injected into the sodium hydroxide. Influences of temperature and concentration of the sodium hydroxide were investigated. Nitrogen gas was injected into the sodium hydroxide as atomizing gas in order to protect the sodium injection nozzle and also to mix the sodium. Then the gas flow rate was also varied to see the desired effects. Injected sodium temperature and mass flow rate were fixed at 200 deg-C and 10 kg/h, respectively. The atomizing gas flow rate, the temperature and concentration of the sodium hydroxide were varied in ranges of 60-100 l/min, 70-100 deg-C and 40-60%, respectively. The influences of these parameters on the sodium conversion reaction were evaluated.

The experiments showed that increase of the atomizing gas resulted in stable injection of the sodium and also larger reaction area. The temperature of the sodium hydroxide had small influences on the reaction, however, the sodium injection nozzle tended to choke up when the temperature was less than 70 deg-C. The lower concentration resulted in larger temperature fluctuation and also enlarged the reaction area. Unstable reaction, for example, sudden increase of reaction rate due to excess sodium, was not found under the conditions above listed ranges and stable sodium conversion was confirmed.

Keywords: Sodium, Sodium Hydroxide, Sodium Conversion, Decommissioning

※ : Cooperative staff

* : Joyo Industry Co., LTD

目 次

| | |
|--------------------------|----|
| 1 緒 言 | 1 |
| 2 試 験 | 2 |
| 2.1 試験装置 | 2 |
| 2.2 測定方法 | 4 |
| 2.3 試験条件 | 4 |
| 3 試験結果 | 6 |
| 3.1 基本条件の結果 | 6 |
| 3.2 アトマイジングガス流量の影響 | 6 |
| 3.3 NaOH温度の影響 | 7 |
| 3.4 NaOH濃度の影響 | 7 |
| 4 考 察 | 8 |
| 4.1 反応領域について | 8 |
| 4.2 試験装置の改良点 | 9 |
| 4.3 実規模装置への提案 | 10 |
| 5 結 言 | 11 |
| 謝 辞 | 12 |
| 参考文献 | 12 |

Contents

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Introduction | 1 |
| 2 | Experiment | 2 |
| 2.1 | Experimental Apparatus | 2 |
| 2.2 | Measurement Techniques | 4 |
| 2.3 | Experimental Condition | 4 |
| 3 | Experimental Results | 6 |
| 3.1 | Result under Basic Conditions | 6 |
| 3.2 | Effect of Atomizing-gas Flow rate | 6 |
| 3.3 | Effect of Sodium Hydroxide Temperature | 7 |
| 3.4 | Effect of Sodium Hydroxide Concentration | 7 |
| 4 | Discussion | 8 |
| 4.1 | Influence on Ration Region | 8 |
| 4.2 | Improvement of Apparatus | 9 |
| 4.3 | Proposal to Large Scale Apparatus | 10 |
| 5 | Conclusions | 11 |
| | Acknowledgements | 12 |
| | References | 12 |

図表リスト

【表リスト】

| | |
|-----------------------|----|
| 表 2.2-1 反応容器内熱電対比較校正值 | 13 |
| 表 3.1-1 ナトリウム注入試験結果 | 14 |

【図リスト】

| | |
|---|----|
| 図 1.1 ナトリウム処理技術の全体フロー | 15 |
| 図 2.1-1 ナトリウム転換基礎試験装置構成図 | 15 |
| 図 2.1-2 ナトリウム転換基礎試験装置 統合図 | 16 |
| 図 2.1-3 苛性割れに及ぼす温度、濃度の関係 | 17 |
| 図 2.1-4 ナトリウム注入ノズル構造図 | 18 |
| 図 2.1-5 ノズルチップ概要図 | 18 |
| 図 2.1-6 反応容器構造図 | 19 |
| 図 2.2-1 反応容器熱電対ツリー取付図 | 19 |
| 図 3.1-1 高温アトマイジングガスによる影響確認 | 20 |
| 図 3.1-2 Na 注入開始時のノズル近傍温度の時間変化（基本条件） | 21 |
| 図 3.1-3 温度上昇の見られる範囲（基本条件） | 21 |
| 図 3.2-1 ノズル近傍温度の時間変化 （アトマイジングガス流量：60Nℓ/min, 100Nℓ/min） | 22 |
| 図 3.2-2 温度上昇の見られる範囲（アトマイジングガス流量の相違） | 23 |
| 図 3.2-3 鉛直方向および水平方向温度分布（アトマイジングガス流量の影響） | 24 |
| 図 3.3-1 ノズル近傍温度の時間変化（NaOH 温度：70°C, 100°C） | 25 |
| 図 3.3-2 温度上昇の見られる範囲（NaOH 温度の相違） | 26 |
| 図 3.3-3 鉛直方向および水平方向温度分布（NaOH 温度の影響） | 27 |
| 図 3.4-1 ノズル近傍温度の時間変化（NaOH 濃度：40wt%, 60wt%） | 28 |
| 図 3.4-2 温度上昇の見られる範囲（NaOH 濃度の相違） | 29 |
| 図 3.4-3 鉛直方向および水平方向温度分布（NaOH 濃度の影響） | 30 |

【写真リスト】

| | |
|---------------------------|----|
| 写真 2.1-1 ナトリウム転換基礎試験装置外観 | 31 |
| 写真 4.1-1 Na 注入ノズルの水中可視化試験 | 32 |

This is a blank page.

1. 緒 言

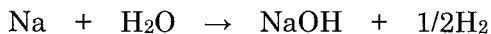
ナトリウム冷却炉の開発を進める上では、その廃止措置にかかる妥当な手法やコストに見通しをもつことは重要な取り組みである。そこで、廃止措置の際に発生する放射性核種を含む大量の放射性物質としてナトリウム（Na）を処理する手法を開発することを目的に、その初期段階として、処理方法の確立を目指した基礎的な技術開発を実施した。これまでの研究開発においてNaの処理にあたり、化学的に活性な金属Naをより安定な物質に転換した後に、その処分へ移行する段階的な方法が提案されている。ここでは、Naを安全かつ経済性を考慮した上で安定した物質に転換（不動態化処理）する技術として海外でも先行例のある、水酸化ナトリウム（NaOH、「苛性ソーダ」）に転換する手法¹⁾を用いることとした。本手法は、米国、フランスなどでそれぞれ独自に開発が進められ、試験研究炉のNa処理に適用されるなど技術開発²⁾が進んでいる。米国では、NaOHの液中に液体Naを注入する手法、フランスではNaOHの液面上に液体Naをスプレーする手法をそれぞれ開発している。NaOHの液中に液体Naを注入する場合には、NaとNaOHの混合が容易である反面、注入ノズルの閉塞が発生しやすい。NaOHの液面上に液体Naをカバーガス中からスプレーする場合には、Na注入ノズルが閉塞することがない反面、比重の軽いNaがNaOHの液面に浮くことから常に新鮮なNaOHで液面を保つよう循環する必要があり、表面にNaが蓄積すると過剰な反応が生じる可能性があるなど、それぞれ優劣がある。

本技術開発では、国内において基礎的な検討がスタートしたばかりであり、大量の放射性Naを処理処分する技術開発を確立する上で、海外の技術を直接導入するのではなく、Na転換処理にかかる課題を把握し大型処理プラントの設計に必要な技術を得て国内で適用する上で、海外の研究を参考にしつつ独自に基盤的なレベルから処理方法の確立を目指すこととした。Na処理技術における本研究の位置づけを図1.1の全体フローに示す。前述のように、本技術開発では、Naを転換する手法として大量処分時の安全性、開発コスト、設備コストを考慮し、Na—水反応によりNaをNaOHに転換する「NaOH処理法」¹⁾を採用した。また、Naの蓄積に伴う過剰反応の可能性を重視し、Na注入の方法としてNaOHの液中に液体Naを注入する方式を選び、その適用性を検討した。

本報では、Na処理の基本特性を把握する上で、放射性核種を含まないNaを用い、Na—水反応によりNaをNaOHに転換する技術における種々の運転パラメータ、すなわちNaOH溶液の温度、濃度、Na注入ノズルの閉塞防止などを目的とするガスの注入量などについて、Na転換処理に与える影響を確認・評価した結果について報告する。また、大量のNa転換処理へ向けた実規模装置への提案についても記載した。

2. 試験

本試験では、Na—水反応を利用して化学的に活性な液体金属Naを安定なNaOHへ転換するため、ナトリウム転換基礎試験装置(Sodium Conversion Test Apparatus: SCOT)を用いて、基礎的な反応特性について確認を実施した。ここで得られたデータは、実規模転換処理システムの仕様を設計するために重要な知見となる。NaのNaOHへの転換は、反応容器内で以下の反応を行わせることである。



SCOTの概要と測定方法および試験条件について以下に説明する。

2.1 試験装置

試験装置の概略構成を図2.1-1、系統構成を図2.1-2、外観を写真2.1-1にそれぞれ示す。本装置は、NaOHを充填した反応容器にNaを溶融して圧送するNa系、NaOHを循環し転換時に発生する反応熱を除去するNaOH系、Na—水反応によって生成される水素ガスを大気へ排出する排ガス系、システムの安全性を常時監視する計測制御系、およびその他のユーティリティ設備から構成される。Na系の主要部材は、Naとの共存性に優れるSUS304或いはSUS316を使用している。また、反応容器並びにNaOH系はNaOHの濃度や温度条件によっては材料の腐食や、苛性割れ(Stress Corrosion Cracking: SCC)が発生する可能性がある。このため、図2.1-3の腐食境界³⁾を考慮した上で、温度および濃度の運転条件に制限を与えることによってSCCを極力抑制し、ステンレス鋼の中で耐食性に優れたSUS316を主に使用した。

以下に、試験装置の能力を示す。

| | |
|-----------|---|
| Na注入速度 | : 1~10kg/h |
| Na注入系運転温度 | : 120~220°C |
| NaOH系運転温度 | : 100°C以下 (能力最大 170°C) |
| NaOH濃度 | : 最大 70wt% (通常 48 wt%前後) |
| NaOH循環流量 | : 最大 2500kg/h |
| 交換熱量 | : 約 61,000kJ/h |
| 純水注入量 | : 約 20Nl/h (注入速度 10kg/h、40wt%にNaOH濃度制御) |
| 反応容器運転圧力 | : -0.098MPa~0.098MPa (ゲージ圧) |

装置の主な構成について以下に示す。

(1) Na系

NaはNa貯蔵タンク内で電気式予熱ヒータによって溶融され、タンクを加圧してNa注入ノズルから反応容器に注入される。Na注入量はタンクのカバーガス圧力(差圧)を調整することにより制御している。図2.1-4にナトリウム注入ノズル構造図、図2.1-5にノズルチップ概略図を示す。Na注入ノズルは、Na注入時の拡散・攪拌および待機時のノズル先端保護用としてノズル周辺から窒素ガスを噴出するアトマイジング方式を採用している。(今後この窒素ガスをアトマイジングガスと呼ぶ)また、待機中はNa注入ノズルにページガスとして窒素を流動させ、ノズル内へのNaOH水溶液の逆流を防止している。Na注入時は、Na注入遮断弁の

開操作と連動してページガス供給止め弁が閉止され Na が注入される。

(2) NaOH系

反応容器は、NaOH 水溶液を充填・加温して、下部に接続した Na 注入ノズルから注入された Na を反応させる小型圧力容器である。図 2.1-6 に反応容器構造図を示す。注入された Na は、NaOH 液面に至るまでに全て NaOH に転換されるよう、注入量その他を制御する。反応により発生する水素ガス等は、排ガス放出口より大気中に放出する。反応容器内の NaOH を循環ポンプにより循環させ、反応熱の除去、濃度制御、反応容器の液位制御を行っている。NaOH の冷却は熱交換器の通水量を調整することにより制御している。NaOH 濃度は連続監視し、Na 注入量から換算して調整した純水量を混合器から供給している。反応容器内の NaOH 量は液位計で常に監視し、Na 転換により生成された NaOH は反応生成物貯蔵タンクに移送して液位を一定に制御している。移送した NaOH はさらに排水処理設備に移送して中和処理する。

(3) 排ガス系

反応容器から放出される排ガス成分は、アトマイジングガスの窒素と Na 転換により発生する水素、および NaOH ミストを含んだ飽和蒸気である。この NaOH ミストを含んだ飽和蒸気が系統内で結露し計装機器の誤作動や配管などの腐食を引き起こすため、ミストトラップ、スクラバ、フィルタによって NaOH ミストを除去している。また、排ガス流量計、排ガス水素計、排ガス酸素計を設置して異常反応等がないことを常時監視している。

(4) 窒素ガス供給系

窒素ガス供給系は、Na 注入ノズルのアトマイジングガスおよびページガス、Na 注入量制御用の Na 貯蔵タンクカバーガス等に使用される窒素ガスを供給する設備である。Na 注入開始前に Na 注入ノズルが NaOH 付着によって閉塞しないよう、Na 注入ノズルのページガス流量を常時監視している。

(5) 蒸気供給系

蒸気供給系は、Na 注入ノズルの閉塞を解除するための設備である。Na 注入ノズル先端が NaOH 付着により閉塞した場合、アトマイジングガスに蒸気を混合してノズル先端部に付着した高濃度 NaOH を溶融させ閉塞を解除する。また、Na 注入開始前のノズル洗浄用および NaOH 濃度計のセンサー部の洗浄用としても使用している。

2.2 測定方法

本試験はNa注入量および反応容器内のNaOH量、NaOH循環流量を一定とし、アトマイジングガス量、NaOH濃度、NaOH温度を変えてNaを注入したときの反応容器内NaOHの温度変動領域を観察し、安定した反応を示す適正な転換条件を確認することを目的に実施した。Na-水反応によりNaOH温度が上昇、あるいは変動することから反応容器内に設置した熱電対46本を取り付けて熱電対ツリーにより温度を測定し、温度変動領域を観察した。図2.2-1の熱電対ツリー取付図に示すように熱電対は、Na注入および拡散の妨げにならないよう間隔をとり容器の片側に配置している。温度測定点が少ないため、測定時はノズル位置と熱電対DT-1が同じ高さの時を基準位置として-20mm～60mmまで20mm間隔で熱電対ツリーを上下に移動させ、各移動位置で5分間温度測定を行った。なお、各プロセス値および熱電対ツリー等の測定は0.5秒で収集した。表2.2-1に熱電対比較校正值を示す。校正により、熱電対の測定精度は±0.5°C以内である。

シース熱電対仕様；

熱電対外径：φ1.6mm

シース材質：NCF600

型式：T35

規格及び階級：JIS C1602-1981、0.75級

2.3 試験条件

(1) 転換試験時のNa注入基本条件

| | |
|---------------|--------------------|
| Na貯蔵タンク溶解温度 | ： 110 °C |
| Na系統温度 | ： 200 °C |
| Na注入ノズル温度 | ： 220 °C |
| Na注入量 | ： 10 kg/h |
| アトマイジングガス温度 | ： 250 °C |
| アトマイジング流量 | ： 80 Nℓ/min |
| NaOH温度 | ： 100 °C |
| NaOH濃度 | ： 48 wt% |
| NaOH循環流量 | ： 2,500 kg/h |
| NaOH液位（NaOH量） | ： 1,000 mm（約180kg） |
| NaOH総量（機器・配管） | ： 約230 kg |

(2) 各パラメータ試験条件

アトマイジング流量はNa注入前の適正流量である60Nℓ/minを最小とし段階的に流量を増加した。NaOH温度およびNaOH濃度の試験範囲は、反応容器等の材質であるSUS316鋼がNaOHによる腐食を抑制するため不動体領域内（図2.1-3参照）で設定した。

① アトマイジングガス

| | |
|-----------|--------------------------|
| アトマイジング流量 | ： 60、70、80、90、100 Nℓ/min |
| NaOH温度 | ： 100°C（一定） |
| NaOH濃度 | ： 45wt%（一定） |

アトマイジングガス量は 60Nℓ/min で注入を開始し、設定値まで流量を上げてデータ収集を行った。

② NaOH温度

アトマイジング流量 : 80 Nℓ/min (一定)

NaOH温度 : 70、80、90、100℃

NaOH濃度 : 45wt% (一定)

本試験は、安定運転を確認した NaOH 温度から Na 注入を開始し、徐々に設定温度まで下げて運転状態が安定していることを確認後、データ収集を行った。

③ NaOH濃度

アトマイジング流量 : 80 Nℓ/min (一定)

NaOH温度 : 80℃ (一定)

NaOH濃度 : 40、45、50、55、60wt%

本試験は、NaOH 濃度 45wt%中に Na を注入しながら徐々に濃度を調整し設定値に合わせ、運転状態が安定していることを確認後、データ収集を行った。

3. 試験結果

試験条件及び試験中の主要プロセス値を表 3.1-1 の Na 注入試験結果に示す。以下に、アトマイジングガス流量、NaOH 温度および NaOH 濃度をパラメータにした温度変動領域の変化と特性について記述する。

3.1 基本条件の結果

まず、Na 注入前に高温アトマイジングガスのみを噴出させた場合の NaOH 温度への影響を確認した結果を図 3.1-1 に示す。試験は、NaOH を所定の温度に設定し NaOH 循環流量 2500kg/h で運転した NaOH 溶液内に、温度 220°C に加温したノズルにバージガス流量 10 Nℓ/min を流し、アトマイジングガス温度 250°C、アトマイジングガス流量 60Nℓ/min を流し反応容器内の熱電対で温度測定を行った。各測定点において温度上昇がないことから、高温アトマイジングガスによる NaOH 温度測定への影響がないことを確認した。

基本条件とした NaOH 温度 100°C、NaOH 濃度 45wt%、アトマイジングガス流量 80Nℓ/min、Na 注入量 10kg/h におけるノズル近傍で測定した温度の時間変化を図 3.1-2 に示す。Na 注入開始と同時に Na-水反応が始まり温度上昇している。注入した Na はアトマイジングガスにより分散され計測点を通過しているため温度が変動している。ノズル近傍では時間平均としても NaOH 温度が上昇していることがわかる。このデータから注入した Na が NaOH 水溶液中に広がって Na-水反応している領域を確認するため各測定点での最高温度を図 3.1-3 に示す。NaOH 温度は、中心方向 40mm で約 50°C を超える温度上昇を示し、温度変動が発生している領域は中心方向へ約 140mm にまで達していると考えられ、横への広がりは約 40° である。高さ方向にはノズル下方 10mm から上方 80mm まで達している。

3.2 アトマイジングガス流量の影響

図 3.2-1 にアトマイジングガス流量 60Nℓ/min と 100Nℓ/min 時のノズル近傍温度の時間変化、図 3.2-2 に各測定位置での最高温度、図 3.2-3 にノズル方向 ($\theta = 0^\circ$) での鉛直および水平方向温度分布をそれぞれ示す。なお、アトマイジングガス流量 100Nℓ/min の時、他の条件に比べ Na 注入量が安定していなかったが連続して Na 注入ができたため 100Nℓ/min を上限とした。

アトマイジングガス流量 60Nℓ/min 時、中心方向 40mm、高さ 10mm の位置で約 50°C 以上の温度上昇があり、温度変動が発生している領域はノズルより反応容器中心方向 170mm まで、横への広がりは約 70° であった。高さ方向にはノズルより下方 10mm、上方へは約 160mm まで達していた。これらの温度変動の領域から見積もると、Na-水反応が生じている領域は約 $8.9 \times 10^5 \text{ mm}^3$ と推定される。

アトマイジングガス流量 100Nℓ/min 時には、中心方向 100mm の位置で約 40°C の温度上昇があり、温度変動が発生している領域は中心方向へ約 200mm まで達していると考えられる。横への広がりは約 40° で、高さ方向にはノズルより下方 10mm、上方へは 50mm まで達している。これらの温度変動の領域から見積もると、Na-水反応が生じている領域は約 $2.8 \times 10^5 \text{ mm}^3$ と推定される。

図 3.2-1 より温度の時間変化を比較すると、アトマイジングガス流量の増加により温度変動に大きな違いは見られない。但し、サンプリング時間が 0.5 秒と粗いことから定量的な比較は難しい。図 3.2-2 に示すようにアトマイジングガス流量 60Nℓ/min では、ノズル近傍で集中して反応し上方へ反応熱が伝搬していることから、水平方向への拡散効果は小さいと思われる。アトマイジングガス流量を増加させると、Na は容器中心方向へ輸送され若干ではあるが温度上昇幅が小さくなり、上方および横方向への広がりが小さくなっていることから、アトマイジングガスの攪拌効果により Na-水反応が生じる領域がノズルの前方に広がることを確認した。

3.3 NaOH 温度の影響

図 3.3-1 に NaOH 温度 100°C と 70°C 時の時のノズル近傍温度の時間変化、図 3.3-2 に各測定位置での最高温度、図 3.3-3 にノズル方向 ($\theta = 0^\circ$) での鉛直および水平方向温度分布をそれぞれ示す。なお、試験条件の 70°C より低い温度ではノズルが閉塞する傾向を示し、NaOH 温度 62°C の時 Na 注入量が不安定になり低下してきたことから試験温度は 70°C を下限とした。

NaOH 温度 70°C 時、中心方向 40mm で約 30°C の温度上昇を示し、温度変動が発生している領域は中心方向へ約 140mm にまで達していると考えられる。横への広がりは約 40° で、高さ方向はノズル下方 10mm から上方約 80mm まで達している。これらの温度変動の領域から見積もると、Na-水反応が生じている領域は約 $2.1 \times 10^5 \text{ mm}^3$ と推定される。

基本条件と同じ条件である NaOH 温度 100°C は、中心方向 40mm で約 50°C を超える温度上昇を示し、Na-水反応が生じている領域は 70°C の時と同様で約 $2.1 \times 10^5 \text{ mm}^3$ と推定される。

NaOH 温度が高いほどノズル近傍での温度上昇幅が大きいが、Na-水反応が生じている領域の差がなかったことから、NaOH 温度はほとんど影響ないと考えられる。

3.4 NaOH 濃度の影響

図 3.4-1 に NaOH 濃度 40wt% と 60wt% 時のノズル近傍温度の時間変化、図 3.4-2 に各測定位置での最高温度、図 3.4-3 にノズル方向 ($\theta = 0^\circ$) での鉛直および水平方向温度分布をそれぞれ示す。NaOH 濃度 40wt% 時、中心方向 40mm で 50°C 以上の温度上昇を示し、温度変動が発生している領域は中心方向へ約 160mm まで達していると考えられる。横への広がりは 50° で、高さ方向はノズル下方 10mm から上方 80mm まで達している。これらの温度変動の領域から見積もると、Na-水反応が生じている領域は約 $3.3 \times 10^5 \text{ mm}^3$ と推定される。

NaOH 濃度 60wt% 時、中心方向 40mm で約 20°C の温度上昇で試験の中では最も温度変動が小さく、温度変動が発生している領域は中心方向約 120mm まで達していると考えられる。横への広がりは 30° で、高さ方向は 0mm から 30mm まで達している。これらの温度変動の領域から見積もると、Na-水反応が生じている領域は約 $3.8 \times 10^4 \text{ mm}^3$ と推定される。

NaOH 濃度は、濃度が低いほど温度変動幅、温度上昇が見られる範囲の広がりがともに大きくなり、その影響が顕著であることを確認した。

4. 考 察

4.1 反応領域について

Na 転換装置の反応容器を設計する上で、NaOH 水溶液中で Na と水が反応する領域を特定する必要がある。Na と水との反応領域の大きさは、内部の反応の総量や注入された Na の広がり等に依存すると考えられる。反応の量は、Na と水の量に対応すると考えられ、Na 注入量や NaOH 濃度すなわち水の濃度に依存することが推定される。また、平衡に達しない場合は、その反応速度にも依存する可能性がある。反応速度は Arrhenius の反応速度論⁴⁾より温度に依存する事が知られている。Na の広がりについては、アトマイジングガスによる拡散の影響が考えられる。そこで、今回の試験結果を基に、アトマイジングガス量、NaOH 温度、NaOH 濃度による反応領域への影響を確認すると共に本試験装置での最適運転条件について検討した。

(1) アトマイジングガスの影響

アトマイジングガスによる反応領域への影響は、試験結果で記述した様にアトマイジングガス量増加により、温度変動領域は反応容器中心部まで到達し、高さ方向には小さくなつた。写真 4.1-1 に本試験で使用した Na 注入ノズルと同形状のノズルを用いて、水中にアトマイジングガスを流入した時の可視化写真を示す。ガスはノズル前方に噴き出し、浮力により上方に移行する。ガス流量が大きいほどより遠くまで気泡が達していることがわかる。NaOH 水溶液中でもこのようなアトマイジングガスによる NaOH の攪拌、Na 随伴により反応領域がノズルから遠くまで広がつたと考えられる。また、反応領域が広がつたことで反応熱が加えられる NaOH 量が増加し、温度上昇幅が低下したと考えられる。本 Na 注入ノズルのアトマイジングガス量は、多いほど NaOH 溶液の温度上昇幅を抑えられるが、Na 注入速度の安定性等を考慮すると 80~90Nl/min が適量であると考える。

(2) NaOH 温度の影響

NaOH 温度が 70°C 時の反応による NaOH の温度上昇は約 20°C であるのに対し、NaOH 温度が 100°C になると NaOH は約 50°C 上昇した。これは、NaOH 温度が高い方が Na-水反応が活性になり NaOH 温度が上昇したと考えられる。しかし、NaOH の温度上昇が見られた領域の広がりは、NaOH 温度の違いによる大きな差がなかった。Na が到達する領域は、Na 注入量とアトマイジングガス量によって決まり、その領域で反応が生じると考えられる。よって、本条件範囲内での NaOH 温度は、温度上昇の見られる領域の大きさに影響を及ぼす要因にならないと考えられる。Na 転換時の NaOH 冷却、排気系へのミスト流出とスクラバの除熱を考慮すると低温で実施することが効率的であり、本装置において NaOH 温度は 70~80°C が適切であると考える。

(3) NaOH 濃度の影響

図 3.4-1~3.4-3 に示したように、NaOH 濃度を高くすることで NaOH の温度上昇幅は大きく低下する。これは、NaOH 水溶液に含まれる水の量が相対的に減少することで、Na-水反応が制限された結果と考えられる。すなわち、相対的にゆっくりと反応が進むため Na がアトマイジングガスの気泡などと共に上方へ浮上する過程で周辺の NaOH と混合することで温度上昇が抑えられていると考えられる。この温度上昇幅が小さい 1~2°C 程度の領域を考慮すると反応領域はもっと広くなり、結果的に NaOH 濃度 40wt%~60wt%において反応領域に差はほと

ふんどないと推測される。本装置の材質 SUS316 による NaOH 腐食を抑制する範囲内 (<100°C) では、NaOH 濃度は 45wt%~55wt% が適切であると考える。

4.2 試験装置の改良点

これまで実施してきた転換試験での経験、試験結果及び結果の評価・考察をもとに、今後 SCOT を用いて継続して実規模に向けて Na 処理量の増大を可能とする試験を実施するために必要な改良点の項目とその内容について記述する。

(1) Na 注入系

Na 注入量を把握する手段として、Na 貯蔵タンクの液位変動値および Na 注入流量計の指示値から積算では精度が劣るため、Na 貯蔵タンク重量を直接測定する秤を設置する必要がある。実際に大型 Na 貯蔵タンク内のナトリウムを転換処理する際は、Na を一時保管するディタンクを設置し、ディタンク重量を直接測定する計器を設置することが考えられる。

本試験装置の Na 注入配管の予熱は、配管系と弁の 2 系統分けされ、200°C に制御されているが、Na 注入試験中は、Na 貯蔵タンクからの 110°C の低温 Na が常に Na 注入配管に供給されるために、制御出力が常時 100% になり下流側や分岐配管などでは設定値以上に上昇する事が確認された。この対策として予熱制御系を系統ごとに細分化する必要がある。

(2) Na 注入ノズル

Na 注入ノズルは、Na 処理量に合ったノズル径を選定し、ノズル毎にアトマイジングガス量等設定する必要がある。また、大量の Na 転換を行う際、複数のノズルを配置することも効率よく処理する手法と考える。

(3) 反応容器

反応容器や NaOH 機器・配管で使用している材質 SUS316 に SCC の影響を及ぼさないとされる NaOH 濃度、温度の範囲内で安定的な運転が可能であることを確認したが、今後は長期運転時における健全性の確認が必要となる。この観点から、反応容器を耐 SCC に対応した材料（例えば Ni 系）とすることや二重容器等にすることが望ましい。また、実規模で使用する反応容器を設定するためには、Na 処理量増加に対応する容量を検討する必要がある。

(4) NaOH 温度制御

熱交換器で冷却される NaOH 温度は融点以上で、冷却水は沸点以下とするため、本温度制御は熱交換器とバイパスラインの NaOH 流量を制御する必要がある。反応容器内の NaOH 温度変動に追従できるよう、現状の制御システムに温度制御による熱交換器入口弁及び熱交換器バイパス弁の流量を相互に制御するシステムの構築が必要である。

また、本冷却システムは Na 処理量に伴う冷却能力の見直しが必要である。

(5) NaOH 濃度制御

反応容器内の濃度を監視し、精度良く制御するためには濃度計の位置を反応容器出口に設置する必要がある。

(6) 反応生成物貯蔵タンク

反応生成物貯蔵タンクの容量は約 170ℓ であり、装置停止後に反応容器内の 120ℓ を受入れるため、Na 転換によって生成される NaOH は約 50ℓ 程度しか受入れることができない。従って、

余剰 NaOH は廃液処理設備に移送しているが、廃液処理設備側に異常を来たした場合、Na 注入試験の継続が困難となる。よって、反応生成物貯蔵タンクの容量アップおよび反応生成物貯蔵タンク液位を常に規定値内に制御する制御系を構築する必要がある。

(7) 廃液処理設備

NaOH 廃液移送配管は高濃度 NaOH による凍結、閉塞しないよう配慮する必要がある。そのため、純水・蒸気フラッシング設備と合わせ予熱ヒータの設置が必要である。

また、連続中和処理システムである pH 計測により塩酸注入量を制御する方法は、中和時ににおけるハンチングをおこすため、pH 計設置位置、攪拌性能向上の改善および廃液受入量、NaOH 濃度等をフィードバックして中和を制御するシステムの構築等が必要である。

(8) 排ガス系

冷却したスクラバの水中に排気ガスを通し、露点を下げ湿分除去する構成は有効であるが、冷却水には NaOH が溶融しチラーユニット等の機器内に流入して腐食する恐れがある。NaOH の流入する系統を狭めるため、スクラバを間接冷却とする必要がある。

4.3 実規模装置への提案

実規模の Na 転換装置において Na 注入速度 200kg/h を想定し、試験装置全般の課題等について記述する。上項で示した実機試験装置の改良点で挙げた内容についても確証試験後に反映することとする。

実機において、Na 転換装置を転換処理後に廃棄処分することを目的とし SCC 範囲に入らない低濃度・低温で転換する場合は、反応容器の材質は SUS316 で十分可能である。しかし、運転時の NaOH の温度、濃度条件の変動さらに長時間稼働等を考慮すると、より耐 SCC に優れた材料（例えば Ni 系）が有効である。また、配管系の材料選択や漏洩対策についても十分に考慮する必要がある。Na 反応領域は横方向の広がりがほとんどないことから、Na 注入ノズルは、1 台で多量に注入するより複数台設置した方が容器径を小さくすることが可能であり、ノズルの異常時においても停止することなく連続した転換処理が可能と考えられる。また、ノズルは常時 NaOH 環境下で、液体 Na が流動し高温の環境下におかれているため、腐食を配慮した Ni 系等の材料を使用する必要がある。また、ノズル内部で Na 注入管が破損しアトマイジングガス配管へ Na が流入した場合の検知の方法について検討する必要がある。

ノズル形状は、本試験で使用した液ノズル（Na 注入ノズル）の外周からアトマイジングガスを流出させ、ノズル外側で混合させる型式が性能的に優れていると考える。ノズルは、実規模処理量による試験を実施し、拡散性、反応領域等の評価を十分に行うと共に、注入速度制御等の運転操作性も考慮したノズル口径および形状を選定すべきである。ノズルの配管内で Na が閉塞しないよう予熱ヒータ及び温度計は重要な設備となる。また、運転中にノズルチップが外れないよう、溶接するなど一体構造とする必要がある。

蒸気供給設備は、ノズル閉塞時はもとより Na 注入開始前にノズルの洗浄用として使用する。アトマイジングガス路は狭く異物などが混入すると閉塞を引き起こす恐れがあるため、蒸気発生器は錆を発生しないよう材質については十分検討する必要がある。

5. 結 言

本書では、Naを安定な化合物であるNaOHに転換する技術開発として、Na転換基礎試験装置を用いてアトマイジングガス量、NaOH温度、NaOH濃度を変動させ、その影響を確認した結果から以下の知見を得た。

- (1) 本試験装置において、運転条件毎のNaー水反応による反応容器内のNaOHの温度上昇幅、反応が生じている領域の範囲を確認した結果、本体系ではNa注入量 10kg/h に対して、NaOH温度 70~100°C、NaOH濃度 40~60wt%の範囲においてNa転換を安定して行うことができるなどを確認した。
- (2) アトマイジングガスは注入するナトリウムを効果的に拡散し、Naー水反応による温度上昇を抑える効果があることが確認された。本試験に使用したNa注入ノズルにおいてアトマイジングガス量は 80~90Nl/min が最良で、それ以上ではNa注入速度が安定しないことを確認した。
- (3) 本試験においてNaOH温度の違いによる反応領域（温度上昇の見られる領域）の大きさにはほとんど差が無かったが、温度が高いほどNaー水反応による温度上昇幅が大きくなることを確認した。本試験装置の排ガス系は低温で運転するほうが優位であるが、NaOH温度 60°C付近ではノズルが閉塞する傾向を示したことから、Na注入量の安定したNaOH温度 70~80°Cが最適な条件である。
- (4) NaOH濃度は薄いほどNaー水反応が顕著になり、反応領域が広く温度上昇も大きくなった。本試験では装置停止後のNaOHの取扱を考慮すると、融点の低いNaOH濃度 45~50wt%が保管しやすく最適な条件である。

謝 辞

本ナトリウム転換試験において液体金属試験技術課の関係者及び常陽産業㈱河井正隆氏、郡司茂氏、試験データ整理において御助力頂いた原子力システム㈱長澤一嘉氏他、業務協力員の方々に多大なる御協力とご助言を頂いたことに熱く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 大道 正雄、川崎 弘嗣、遠藤 康志、仲井 悟「大量ナトリウム処理技術開発－ナトリウム転換基礎試験装置の製作と試運転結果－」JNC TN9410 2002-004
- (2) 中山 富佐雄、榎戸 裕二、吉田 英一、松本 寿之、長谷部 慎一「放射性ナトリウムの洗浄・処理技術に関する調査」JNC TN9420 2005-001
- (3) 腐食防食データブック平成7年6月15日発行 社団法人腐食防止協会 大久保ら：化学工学便覧. Vol40. p. 577 (1976)
- (4) 井上 達也「反応工学計算法」 1963 朝倉書店

表 2.2-1 反応容器内熱電対比較校正值

単位: °C

| 基準温度 反応容器出口温度 (TE-16) | | 24.06 | | 54.26 | | 97.41 | |
|-----------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 測定位置 ノズルからの 高さ (mm) | Ch No. | 指示値 | 誤差 | 指示値 | 誤差 | 指示値 | 誤差 |
| 200 | DT 3-6 | 24.02 | 0.04 | 54.20 | 0.06 | 97.37 | 0.04 |
| 200 | DT 2-6 | 24.03 | 0.03 | 54.23 | 0.03 | 97.50 | -0.09 |
| 200 | DT 1-6 | 24.03 | 0.03 | 54.27 | -0.01 | 97.50 | -0.09 |
| 100 | DT 3-5B | 24.32 | -0.26 | 54.45 | -0.19 | 97.82 | -0.41 |
| 100 | DT 2-5 | 24.01 | 0.05 | 54.24 | 0.02 | 97.46 | -0.05 |
| 100 | DT 1-5 | 23.99 | 0.06 | 54.35 | -0.10 | 97.59 | -0.18 |
| 50 | DT12-4 | 23.99 | 0.07 | 54.22 | 0.04 | 97.50 | -0.09 |
| 50 | DT10-4 | 23.97 | 0.09 | 54.22 | 0.04 | 97.47 | -0.06 |
| 50 | DT 3-4 | 23.99 | 0.07 | 54.21 | 0.05 | 97.42 | -0.01 |
| 50 | DT 2-4 | 24.00 | 0.06 | 54.24 | 0.02 | 97.54 | -0.13 |
| 50 | DT 1-4B | 24.10 | -0.04 | 54.44 | -0.19 | 97.75 | -0.34 |
| 20 | DT11-3 | 23.98 | 0.07 | 54.25 | 0.00 | 97.55 | -0.14 |
| 20 | DT10-3 | 24.00 | 0.06 | 54.29 | -0.03 | 97.54 | -0.13 |
| 20 | DT 9-3 | 24.05 | 0.01 | 54.40 | -0.14 | 97.67 | -0.26 |
| 20 | DT 4-3 | 24.04 | 0.02 | 54.59 | -0.34 | 97.83 | -0.42 |
| 20 | DT 3-3B | 24.31 | -0.25 | 54.52 | -0.26 | 97.88 | -0.47 |
| 20 | DT 2-3B | 24.05 | 0.00 | 54.47 | -0.22 | 97.86 | -0.45 |
| 20 | DT 1-3B | 24.08 | -0.03 | 54.20 | 0.06 | 96.95 | 0.47 |
| 10 | DT11-2 | 23.99 | 0.07 | 54.27 | -0.01 | 97.56 | -0.15 |
| 10 | DT10-2 | 24.04 | 0.02 | 54.58 | -0.33 | 97.82 | -0.41 |
| 10 | DT 9-2 | 24.05 | 0.01 | 54.40 | -0.14 | 97.70 | -0.29 |
| 10 | DT4-2 | 23.96 | 0.10 | 54.29 | -0.03 | 97.61 | -0.20 |
| 10 | DT3-2B | 24.31 | -0.25 | 54.50 | -0.24 | 97.87 | -0.46 |
| 10 | DT 2-2B | 24.05 | 0.01 | 54.51 | -0.25 | 97.91 | -0.50 |
| 10 | DT 1-2B | 24.07 | -0.02 | 54.44 | -0.18 | 97.84 | -0.43 |
| 0 | DT18-1 | 23.85 | 0.21 | 54.16 | 0.10 | 97.45 | -0.04 |
| 0 | DT16-1 | 23.95 | 0.11 | 54.30 | -0.04 | 97.62 | -0.21 |
| 0 | DT15-1 | 23.95 | 0.10 | 54.22 | 0.04 | 97.49 | -0.08 |
| 0 | DT14-1 | 23.97 | 0.09 | 54.19 | 0.07 | 97.48 | -0.07 |
| 0 | DT12-1B | 24.30 | -0.24 | 54.52 | -0.26 | 97.91 | -0.50 |
| 0 | DT11-1B | 24.30 | -0.25 | 54.47 | -0.21 | 97.91 | -0.49 |
| 0 | DT10-1B | 24.31 | -0.26 | 54.54 | -0.28 | 97.92 | -0.50 |
| 0 | DT 8-1 | 24.03 | 0.03 | 54.39 | -0.13 | 97.68 | -0.27 |
| 0 | DT 7-1 | 24.05 | 0.00 | 54.42 | -0.16 | 97.70 | -0.29 |
| 0 | DT 6-1 | 24.11 | -0.06 | 54.41 | -0.15 | 97.72 | -0.31 |
| 0 | DT 4-1B | 24.31 | -0.26 | 54.55 | -0.29 | 97.90 | -0.49 |
| 0 | DT 3-1B | 24.02 | 0.03 | 54.74 | -0.48 | 97.91 | -0.50 |
| 0 | DT 1-1B | 24.05 | 0.00 | 54.49 | -0.23 | 97.87 | -0.46 |
| -20 | DT12-0 | 23.95 | 0.10 | 54.22 | 0.04 | 97.52 | -0.11 |
| -20 | DT11-0 | 23.97 | 0.09 | 54.22 | 0.04 | 97.49 | -0.08 |
| -20 | DT10-0 | 24.02 | 0.04 | 54.39 | -0.14 | 97.70 | -0.28 |
| -20 | DT 9-0 | 24.03 | 0.02 | 54.42 | -0.16 | 97.72 | -0.31 |
| -20 | DT 4-0 | 23.94 | 0.11 | 54.21 | 0.05 | 97.53 | -0.11 |
| -20 | DT 3-0B | 24.01 | 0.04 | 54.54 | -0.28 | 97.91 | -0.49 |
| -20 | DT 2-0 | 23.98 | 0.07 | 54.23 | 0.03 | 97.53 | -0.12 |
| -20 | DT 1-0B | 24.03 | 0.03 | 54.57 | -0.31 | 97.91 | -0.50 |

表 3.1-1 ナトリウム注入試験結果

| 試験項目 | 試験条件 | | | | Na | | | | NaOH | | | | 排ガス | | | | 温度変動領域(推定) | | | |
|------------------|------------------|---|-----------------|----------------|----------------|---------------|-------|--------|------|--------|-------|--------------------|-----|----------------|----------|----------|------------|-------------------------|--|--|
| | Na注入速度 (kg/h) | アマイシング ガス流量 (N ₂ /min) | NaOH濃度 (wt%) | NaOH温度 (°C) | 注入速度 FIC-11 | 注入温度 TI-30 | TI-16 | FT-1 | DI-1 | LIC-2 | FT-2 | H ₂ I-2 | 流量 | 水素濃度 (Vol%) | 高さ mm | 距離 mm | 角度 deg | 反応容積 mm ³ | | |
| アマイシング ガス流量試験 | 10 | 60 | 100 | 45 | 10.9 | 190.6 | 101.2 | 2566.6 | 45.7 | 1015.9 | 180.4 | 55.6 | 170 | 160 | 70 | 8.9E+05 | | | | |
| | 10 | 70 | 100 | 45 | 9.4 | 188.0 | 100.1 | 2544.1 | 45.3 | 1007.2 | 176.1 | 53.7 | 150 | 140 | 60 | 5.1E+05 | | | | |
| | 10 | 80 | 100 | 45 | 9.7 | 193.6 | 100.2 | 2561.0 | 46.0 | 1016.9 | 189.4 | 52.5 | 100 | 170 | 50 | 4.2E+05 | | | | |
| | 10 | 90 | 100 | 45 | 10.6 | 197.5 | 99.4 | 2553.6 | 45.5 | 1017.1 | 207.6 | 52.1 | 70 | 170 | 40 | 2.4E+05 | | | | |
| | 10 | 100 | 100 | 45 | 9.9 | 196.2 | 99.3 | 2544.2 | 45.5 | 1017.8 | 211.4 | 50.1 | 60 | 200 | 40 | 2.8E+05 | | | | |
| | 10 | 80 | 70 | 45 | 10.3 | 193.2 | 70.1 | 2471.1 | 45.8 | 1015.5 | 193.6 | 52.9 | 90 | 140 | 40 | 2.1E+05 | | | | |
| | 10 | 80 | 80 | 45 | 10.4 | 193.2 | 80.9 | 2435.6 | 45.3 | 1016.4 | 195.7 | 53.1 | 90 | 140 | 40 | 2.1E+05 | | | | |
| | 10 | 80 | 90 | 45 | 10.0 | 191.7 | 89.8 | 2525.0 | 45.7 | 1017.0 | 191.8 | 52.8 | 90 | 140 | 40 | 2.1E+05 | | | | |
| | 10 | 80 | 100 | 45 | 9.7 | 193.6 | 100.2 | 2561.0 | 46.0 | 1016.9 | 189.4 | 52.5 | 90 | 140 | 40 | 2.1E+05 | | | | |
| | 10 | 80 | 80 | 45 | 9.7 | 196.8 | 79.9 | 2554.3 | 39.1 | 1012.6 | 191.4 | 52.5 | 90 | 160 | 50 | 3.3E+05 | | | | |
| NaOH濃度 試験 | 10 | 80 | 80 | 50 | 10.4 | 193.2 | 80.9 | 2435.6 | 46.0 | 1016.4 | 195.7 | 53.1 | 70 | 150 | 30 | 1.4E+05 | | | | |
| | 10 | 80 | 80 | 55 | 10.1 | 191.3 | 79.6 | 2532.1 | 53.3 | 1013.2 | 193.7 | 52.8 | 30 | 120 | 30 | 3.8E+04 | | | | |
| | 10 | 80 | 80 | 60 | 9.9 | 193.9 | 79.4 | 2444.8 | 58.3 | 1012.0 | 191.3 | 52.5 | 30 | 120 | 30 | 3.8E+04 | | | | |

一定条件：Na注入速度=10kg/h、アトマイジングガス温度=250°C、NaOH循環流量=2500kg/h

■：基本条件

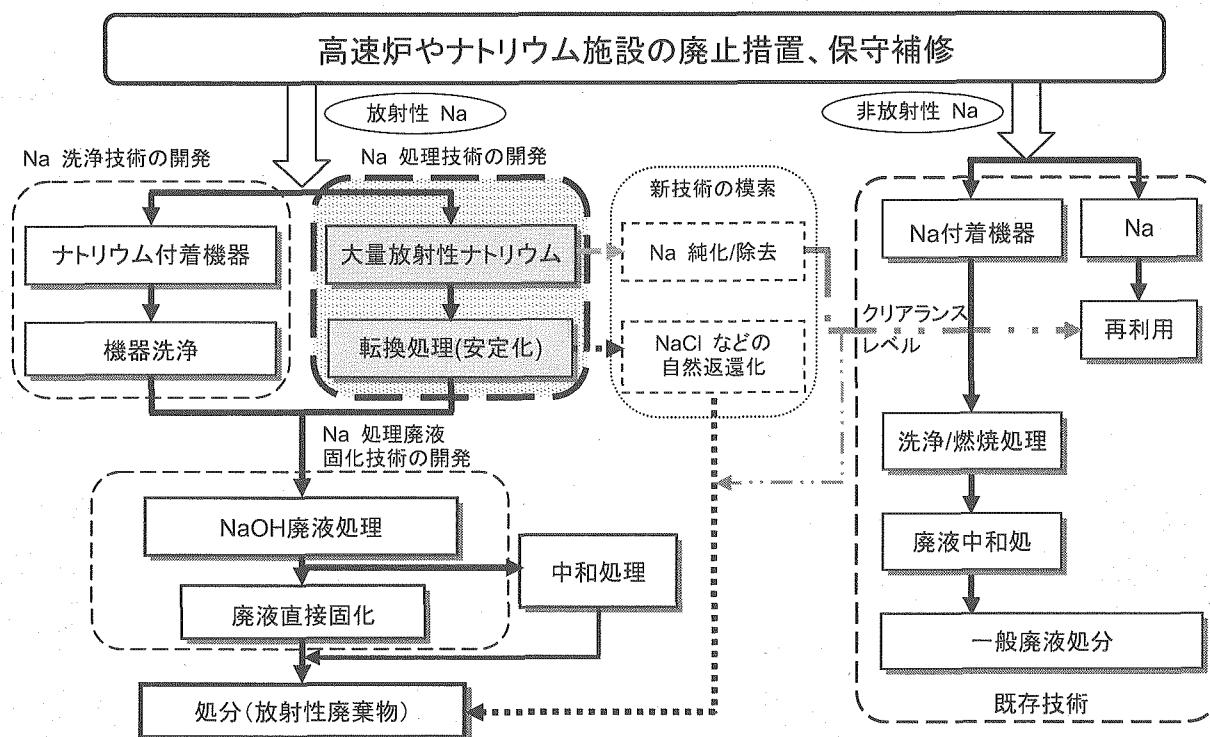


図 1.1 ナトリウム処理技術の全体フロー

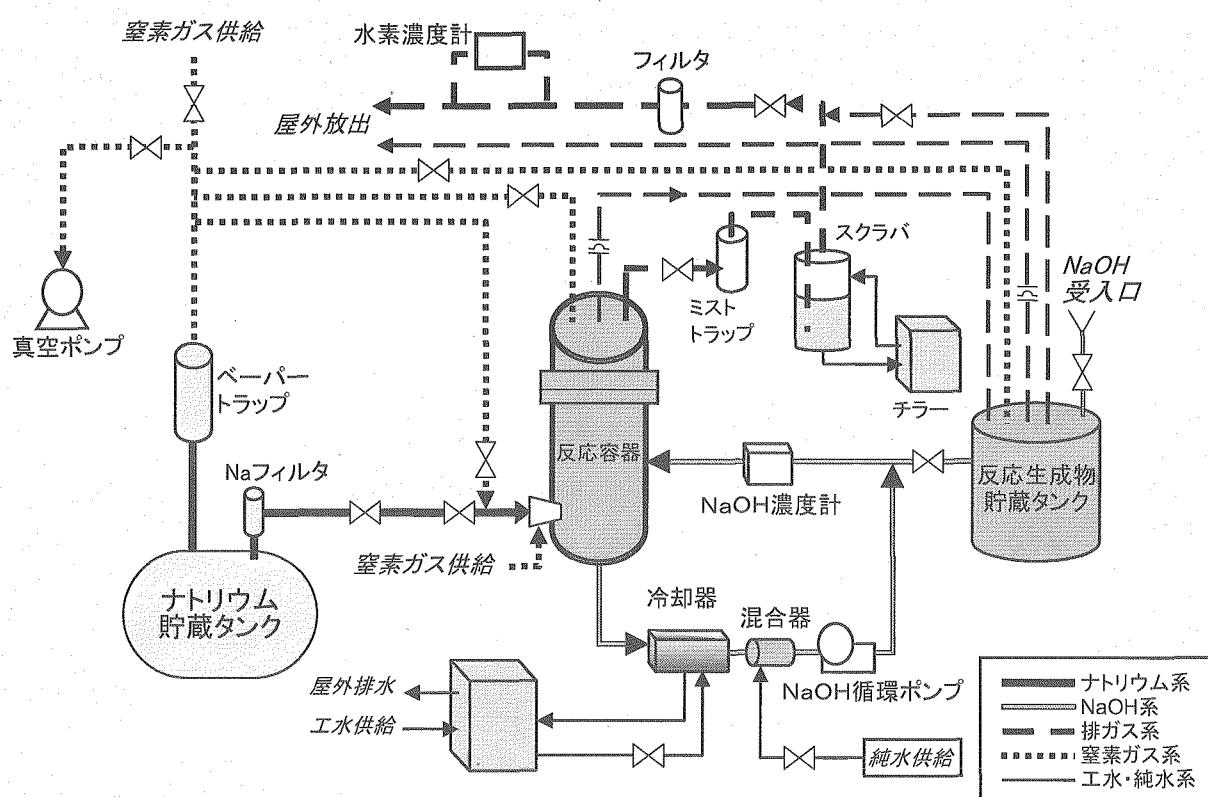


図 2.1-1 ナトリウム転換基礎試験装置構成図

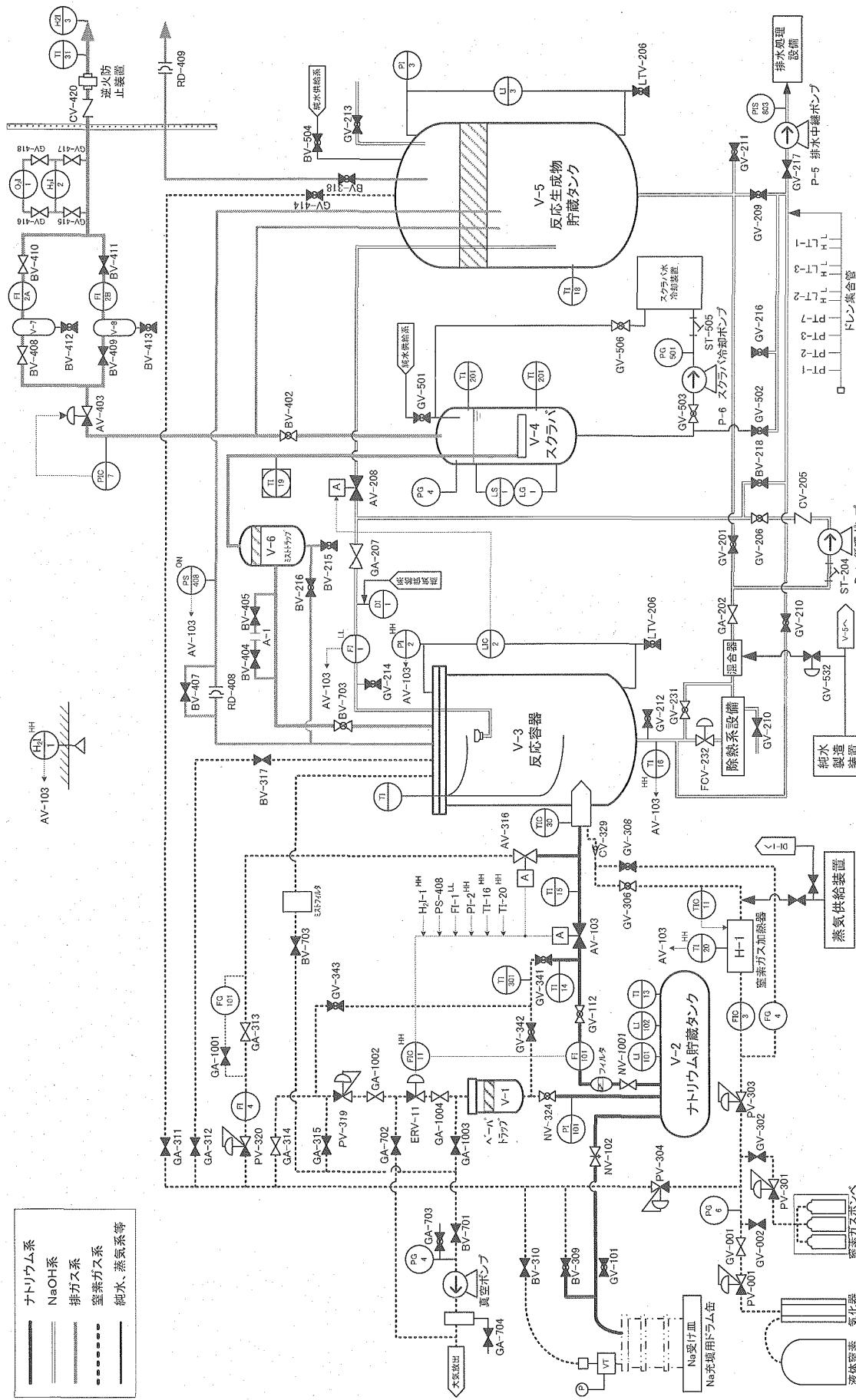
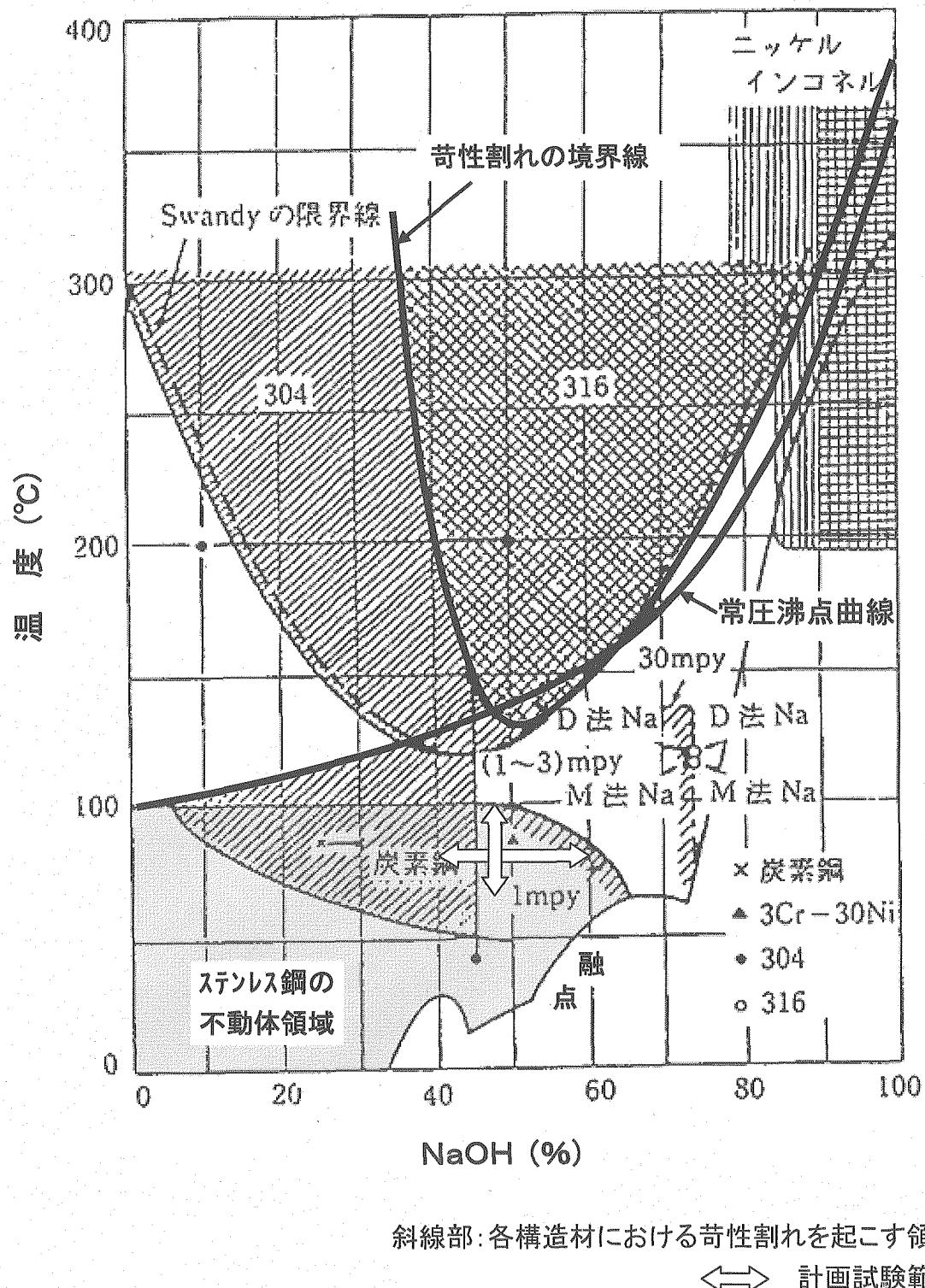


図2.1-2 ナトリウム循環基礎試験装置 系統図



出典 腐食防食データブック平成7年6月15日発行 社団法人腐食防止協会 大久保ら:
化学工学便覧. Vol140. p. 577 (1976)

図 2.1-3 苛性割れに及ぼす温度、濃度の関係

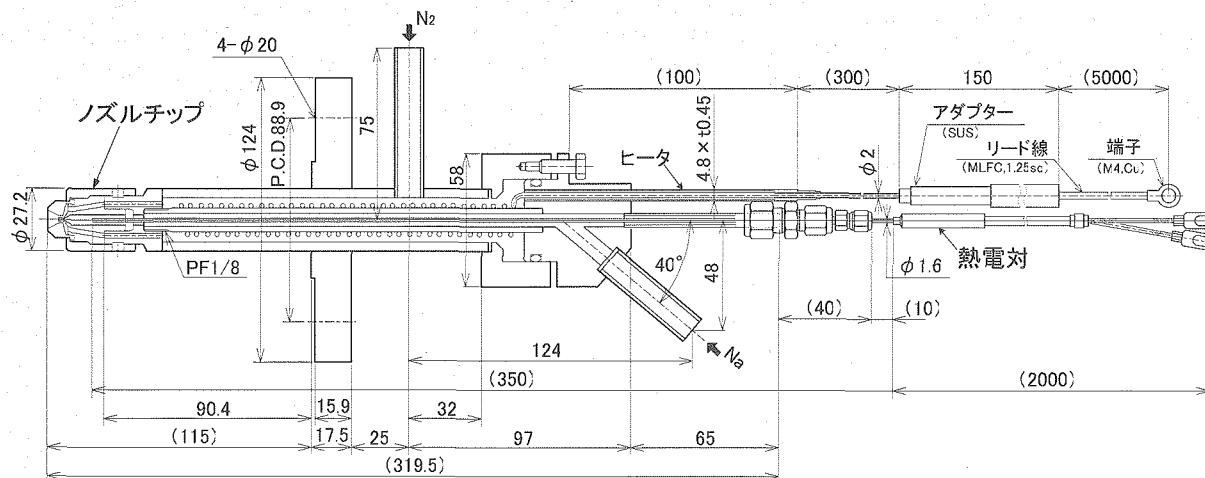


図 2.1-4 ナトリウム注入ノズル構造図

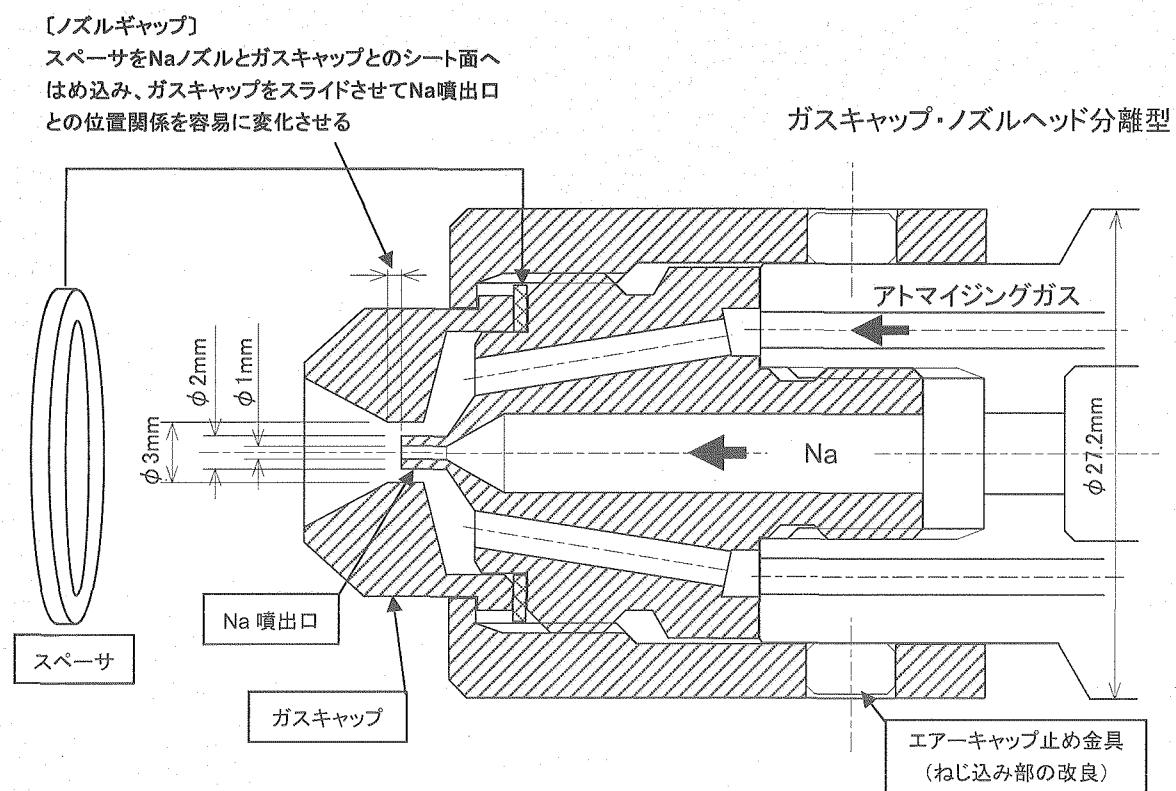


図 2.1-5 ノズルチップ概要図

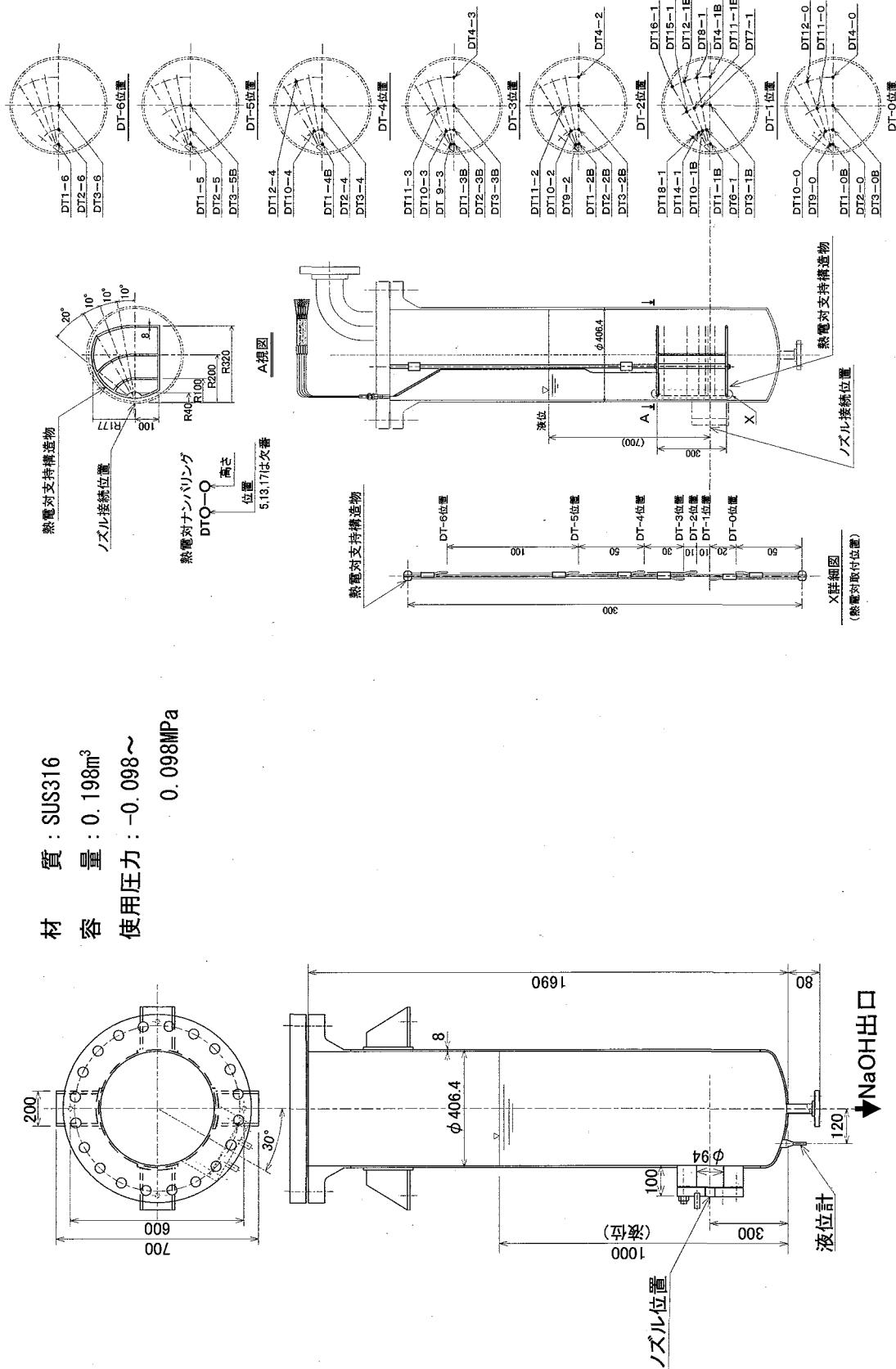


図 2.1-6 反応容器構造

図 2.2-1 反応容器熱電対シリ一取付図

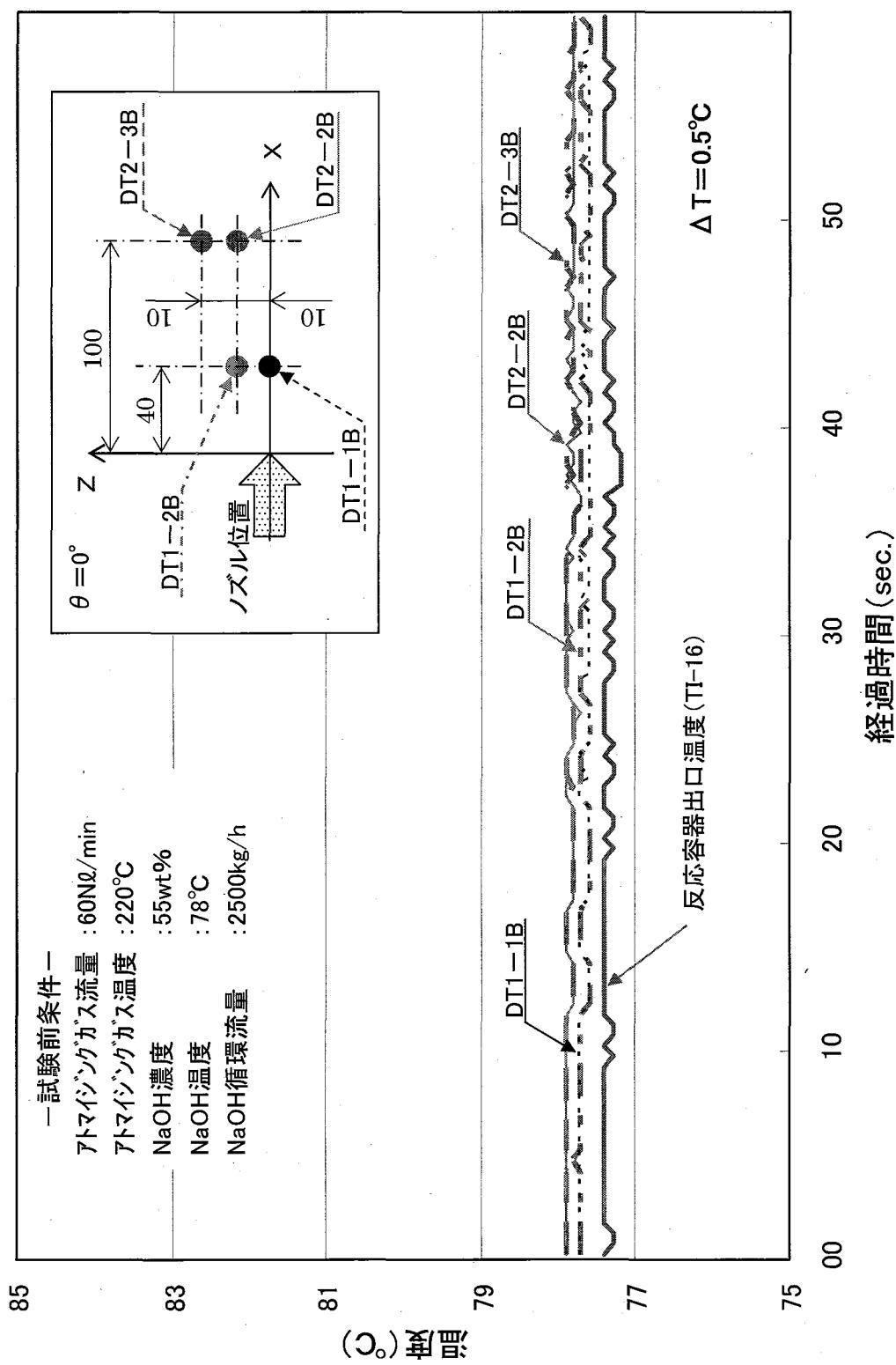


図 3.1-1 高温アトマイジングガスによる影響確認

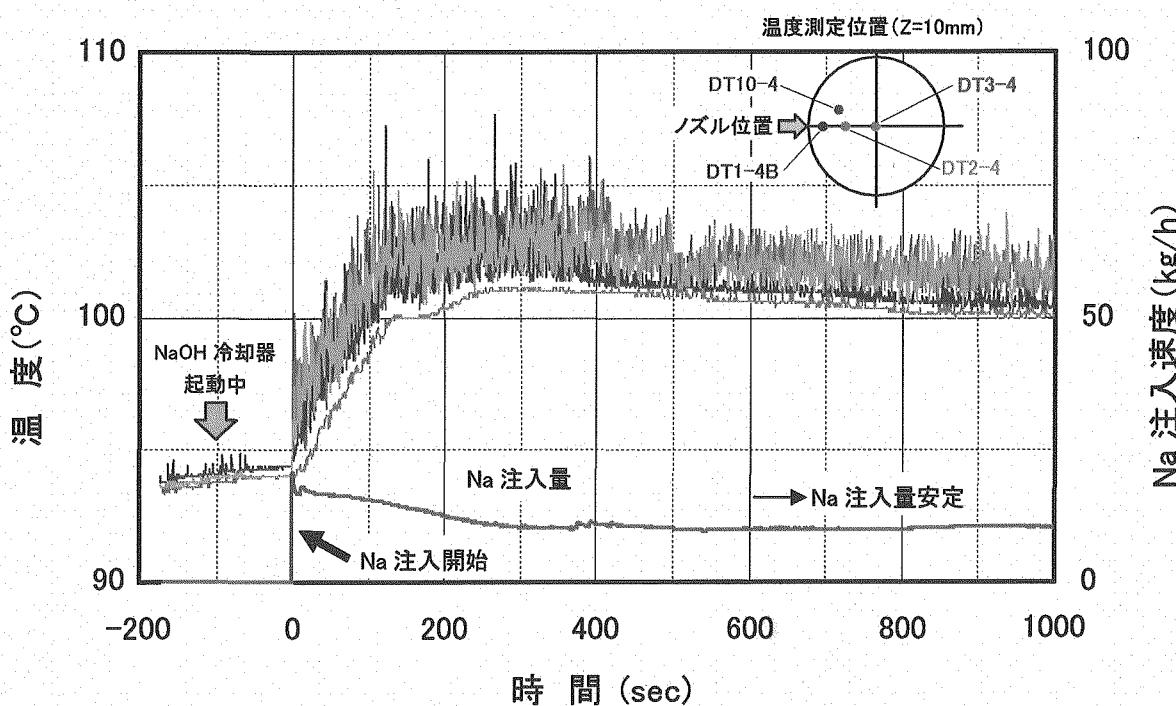


図 3.1-2 Na 注入開始時の
ノズル近傍温度の時間変化(基本条件)

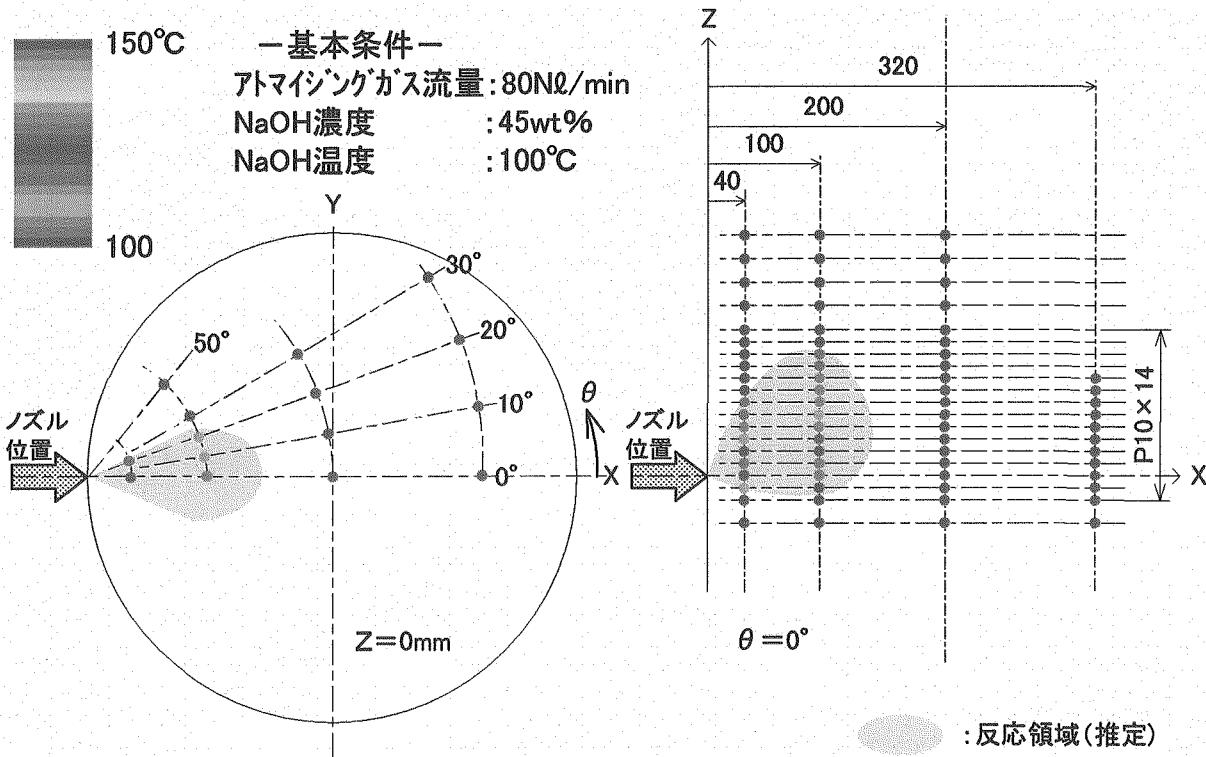


図 3.1-3 温度上昇の見られる範囲(基本条件)

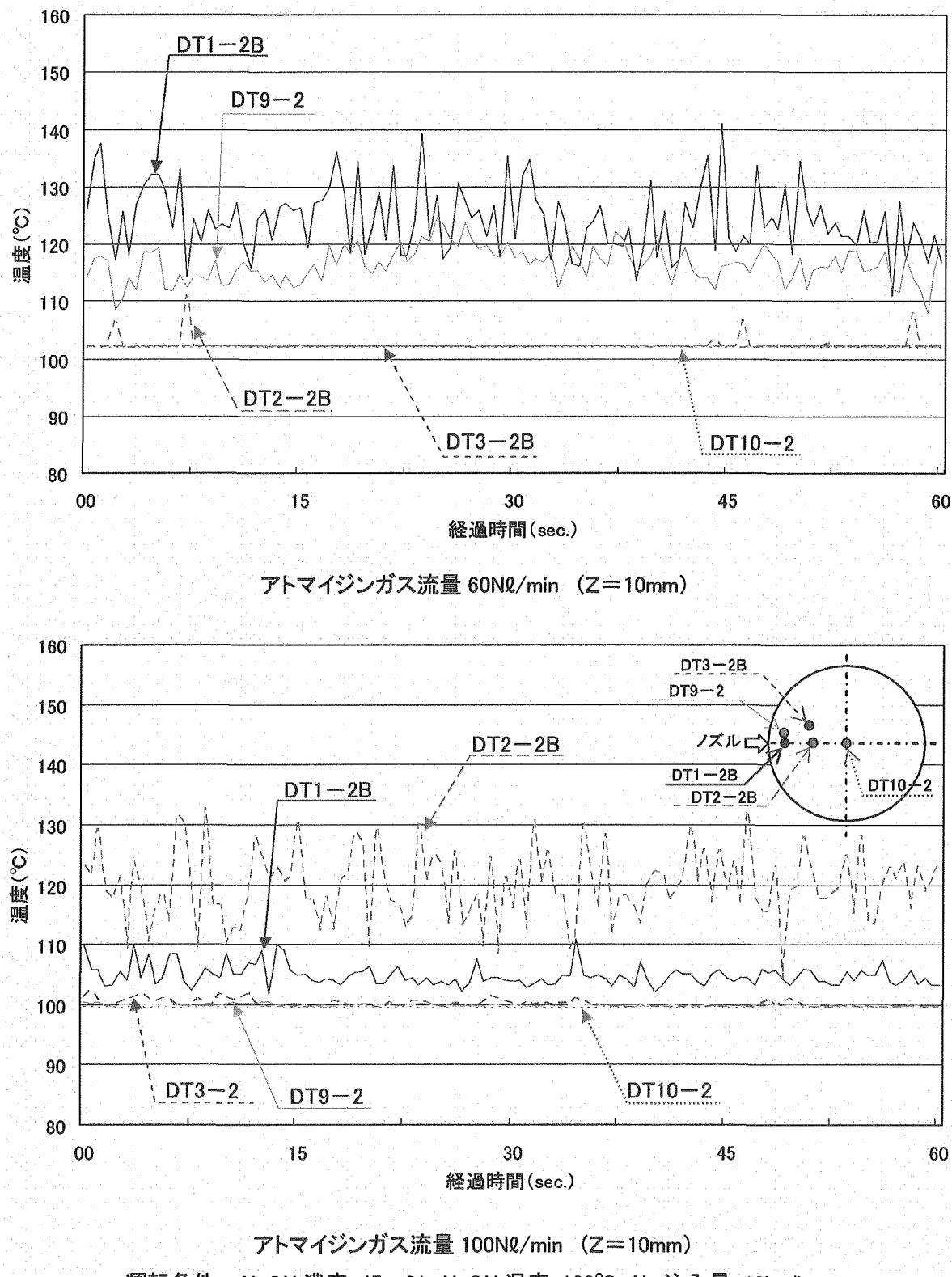
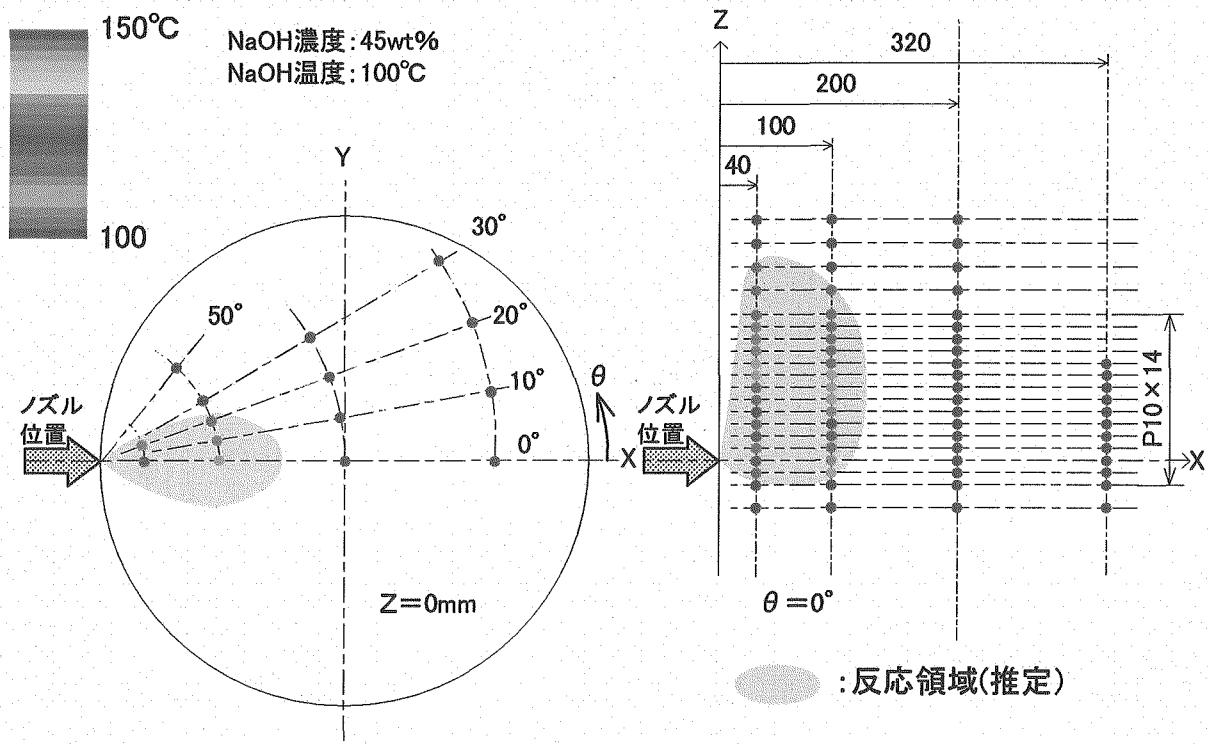
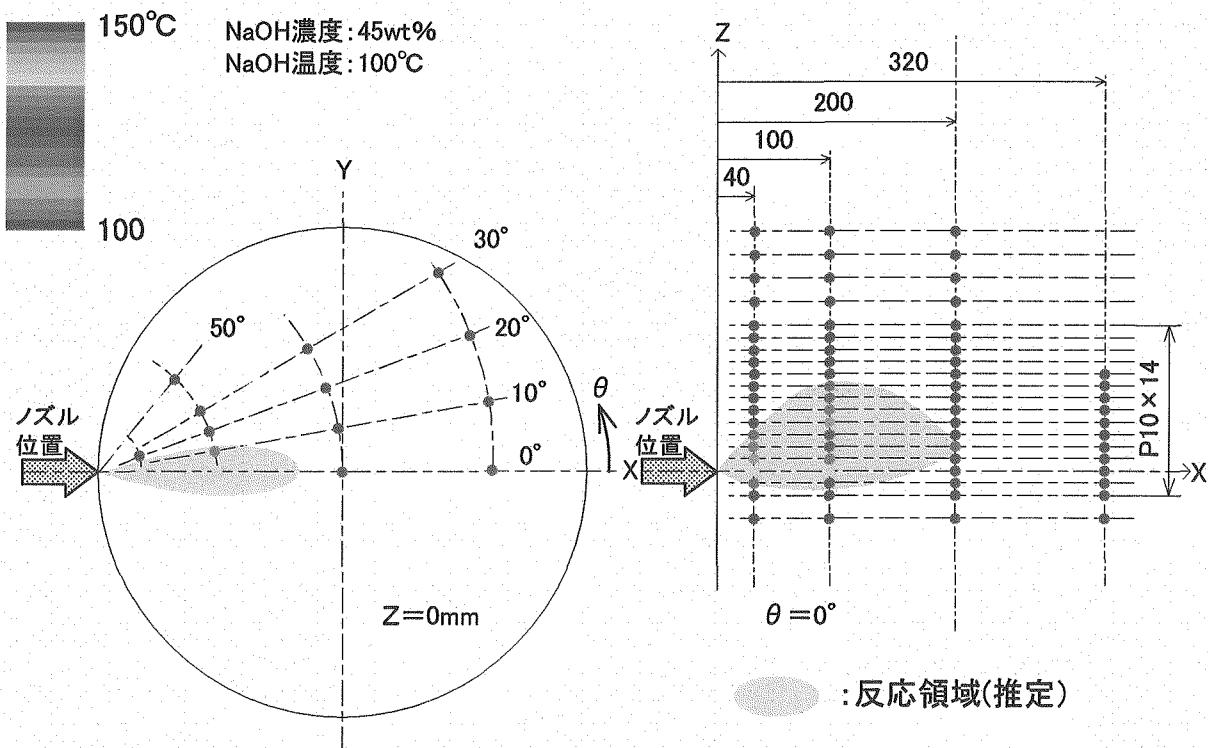


図 3.2-1 ノズル近傍温度の時間変化

(アトマイジンガス流量: $60\text{Nl}/\text{min}, 100\text{Nl}/\text{min}$)



- アトマイジングガス流量: 60Nl/min -



- アトマイジングガス流量: 100Nl/min -

図3.2-2 溫度上昇の見られる範囲（アトマイジングガス流量の相違）

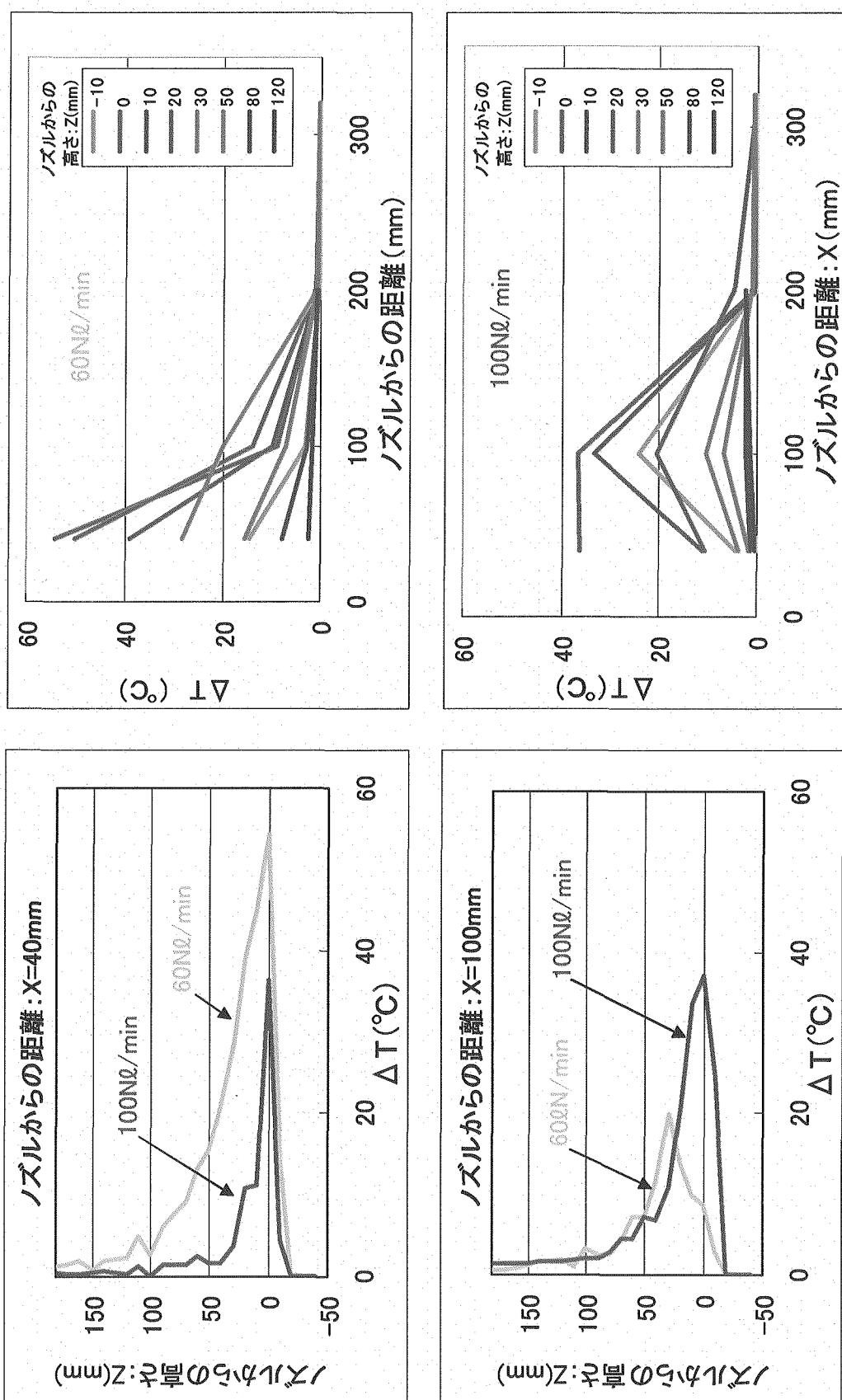
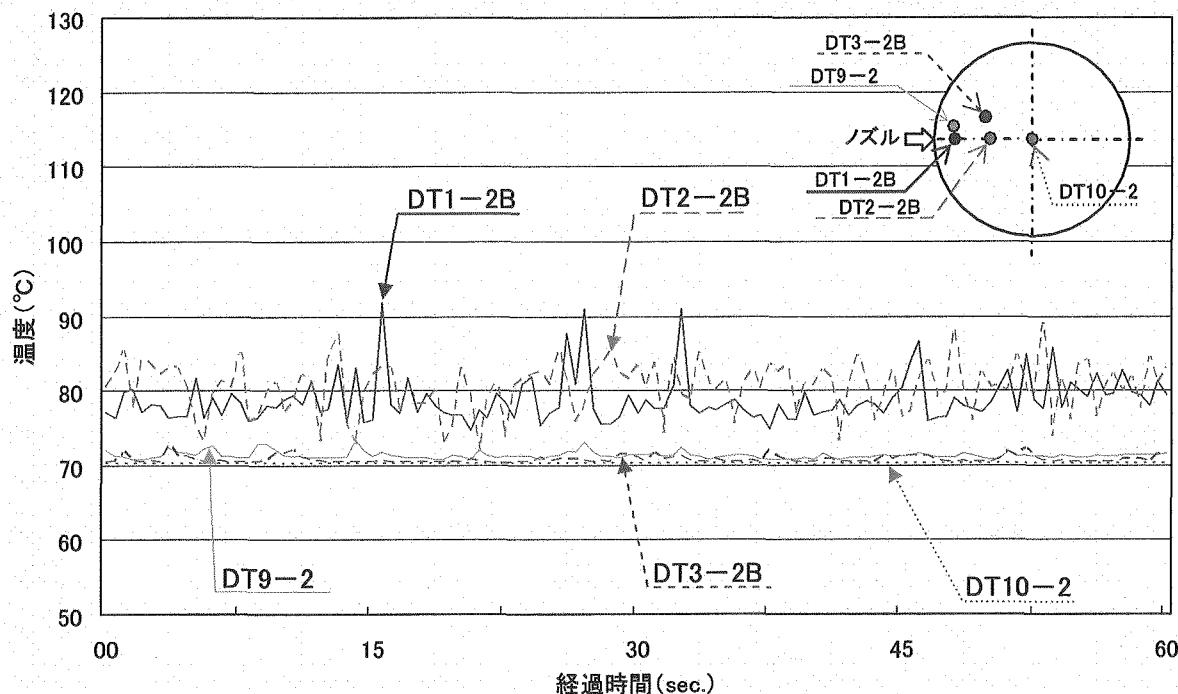
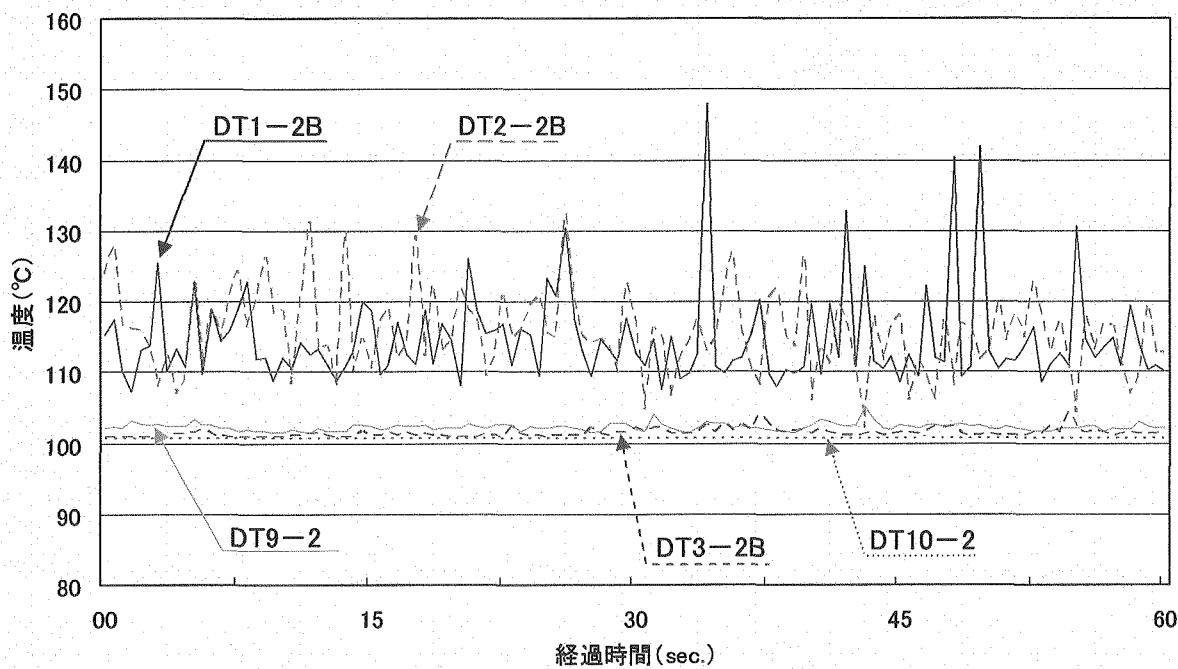


図 3.2-3 鉛直方向および水平方向温度分布(アトマイジングガス流量の影響)

NaOH 温度 70°C ($Z=10\text{mm}$)NaOH 温度 100°C ($Z=10\text{mm}$)

運転条件: NaOH 濃度: 45wt%、アトマイジングガス流量: 80Nl/min、Na 注入量: 10kg/h、

図 3.3-1 ノズル近傍温度の時間変化

(NaOH 温度: 70°C, 100°C)

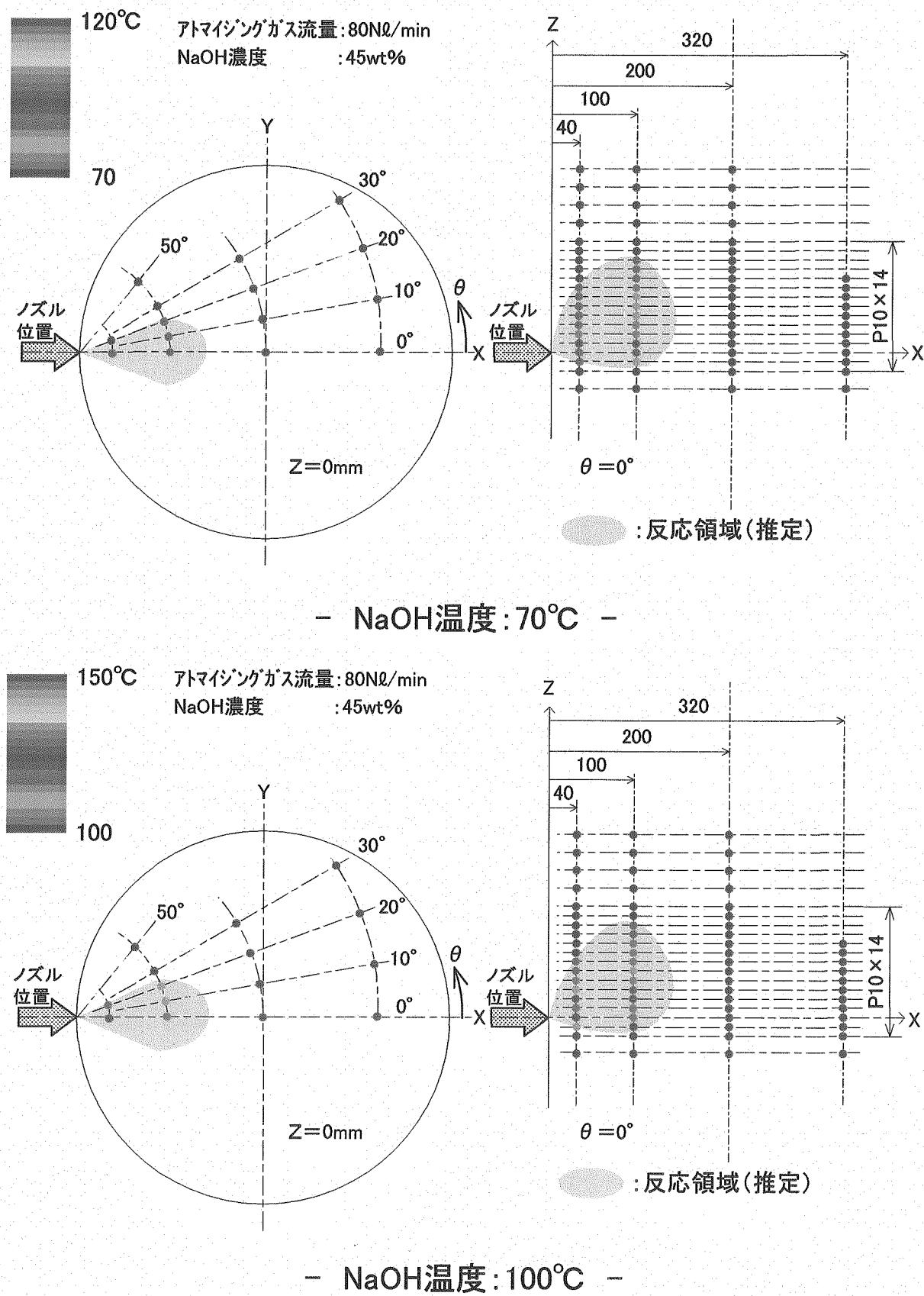


図3.3-2 溫度上昇の見られる範囲 (NaOH温度の相違)

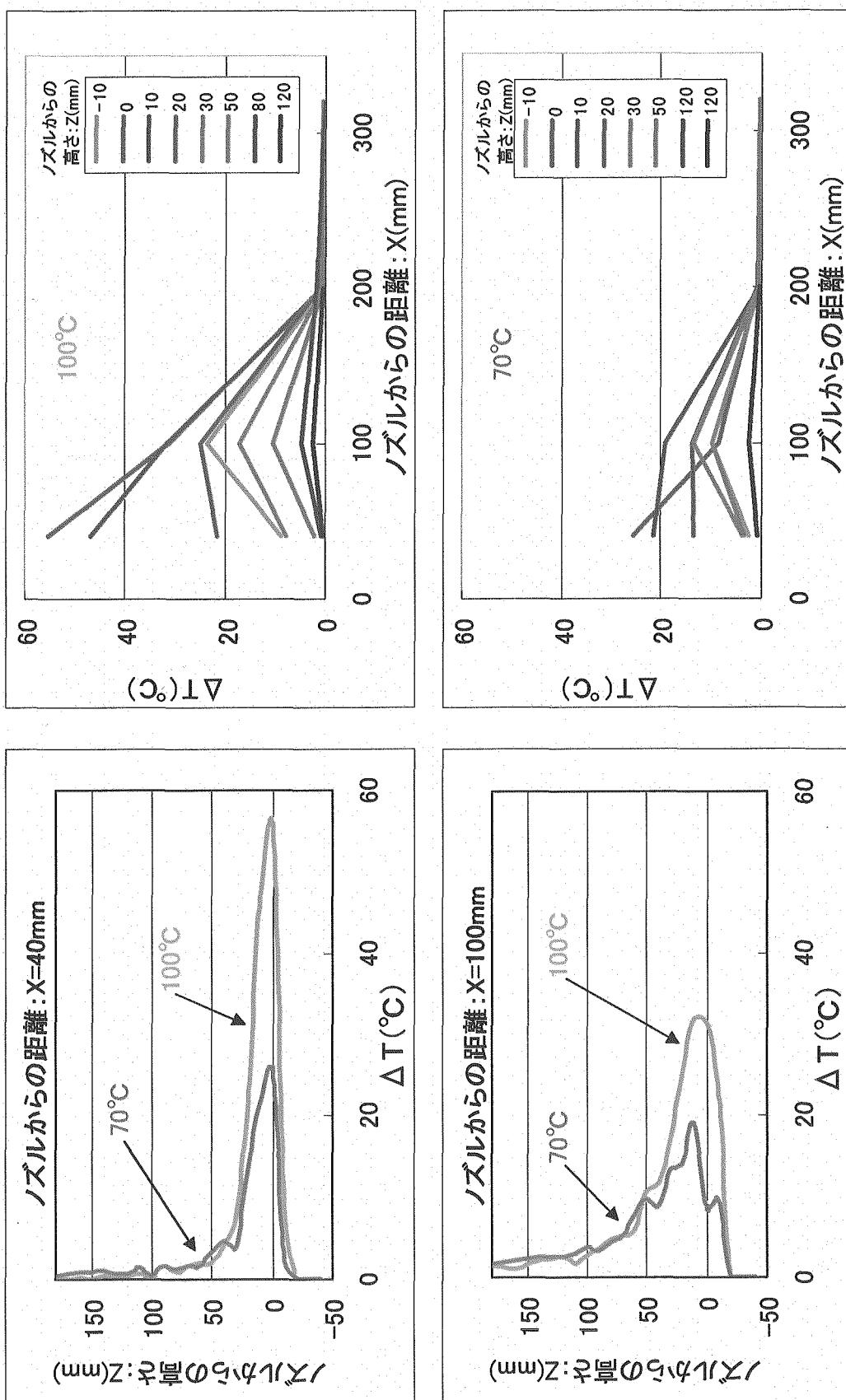


図 3.3-3 鉛直方向および水平方向温度分布(NaOH 温度の影響)

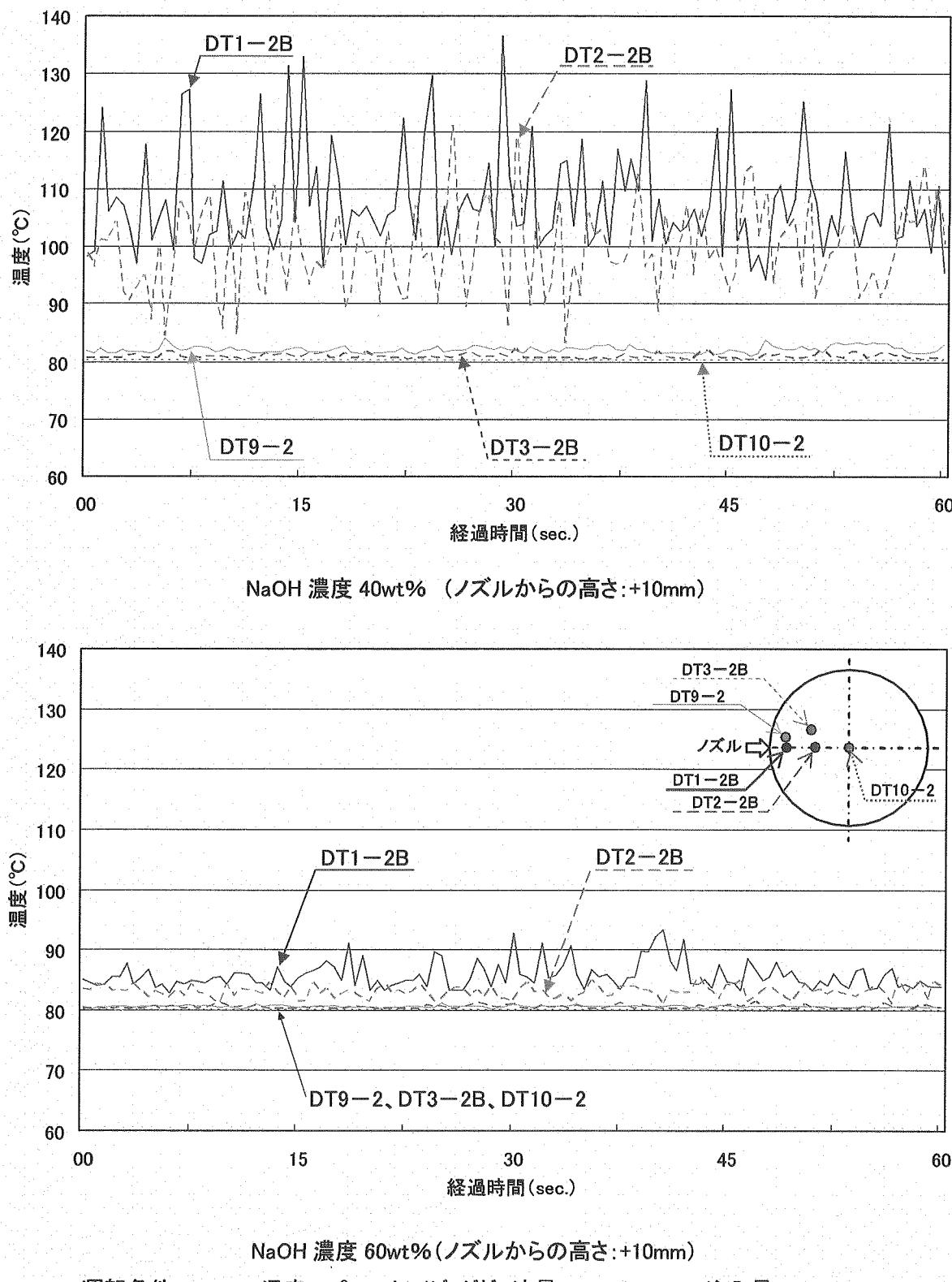
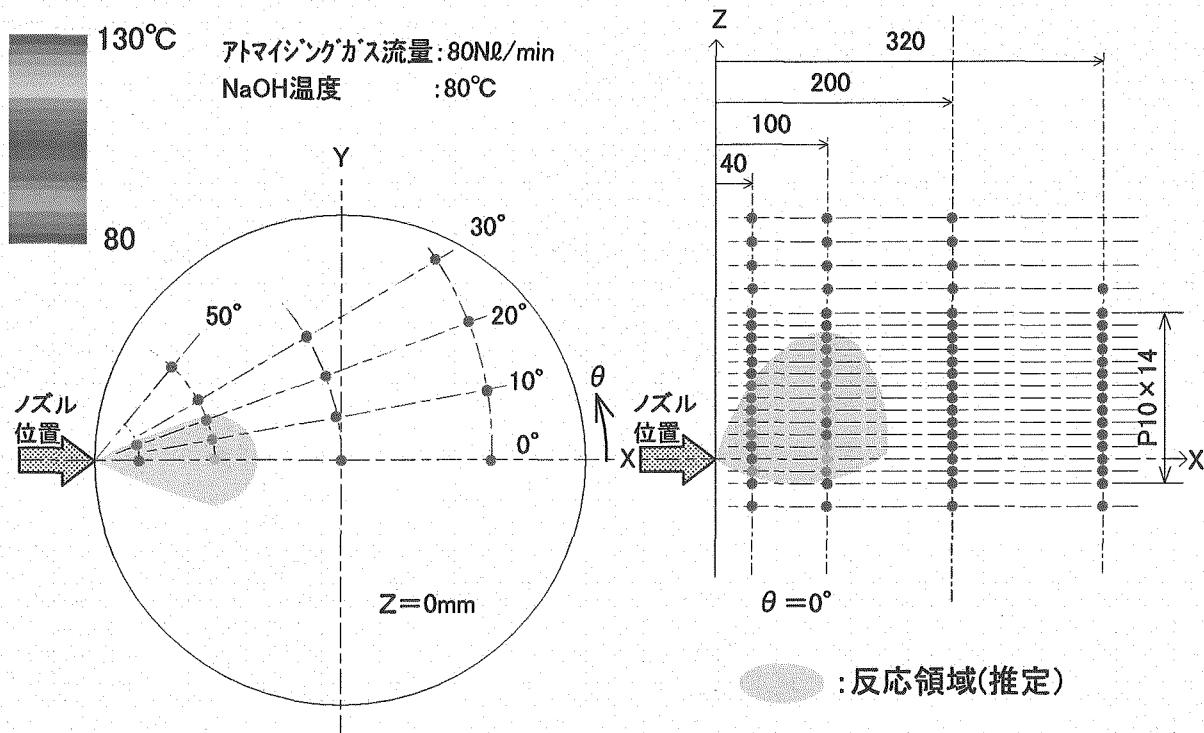
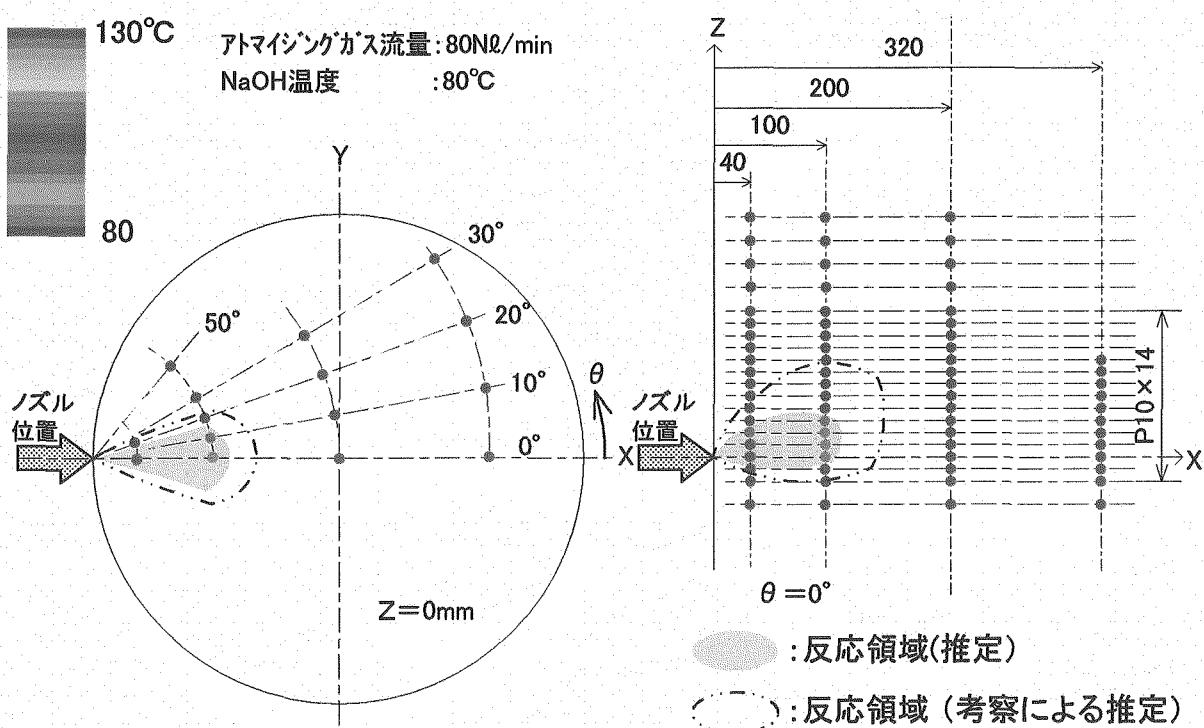


図 3.4-1 ノズル近傍温度の時間変化

(NaOH 濃度:40wt%, 60wt%)



-NaOH濃度40wt%-



-NaOH濃度60wt%-

図3.4-2 温度上昇の見られる範囲 (NaOH濃度の相違)

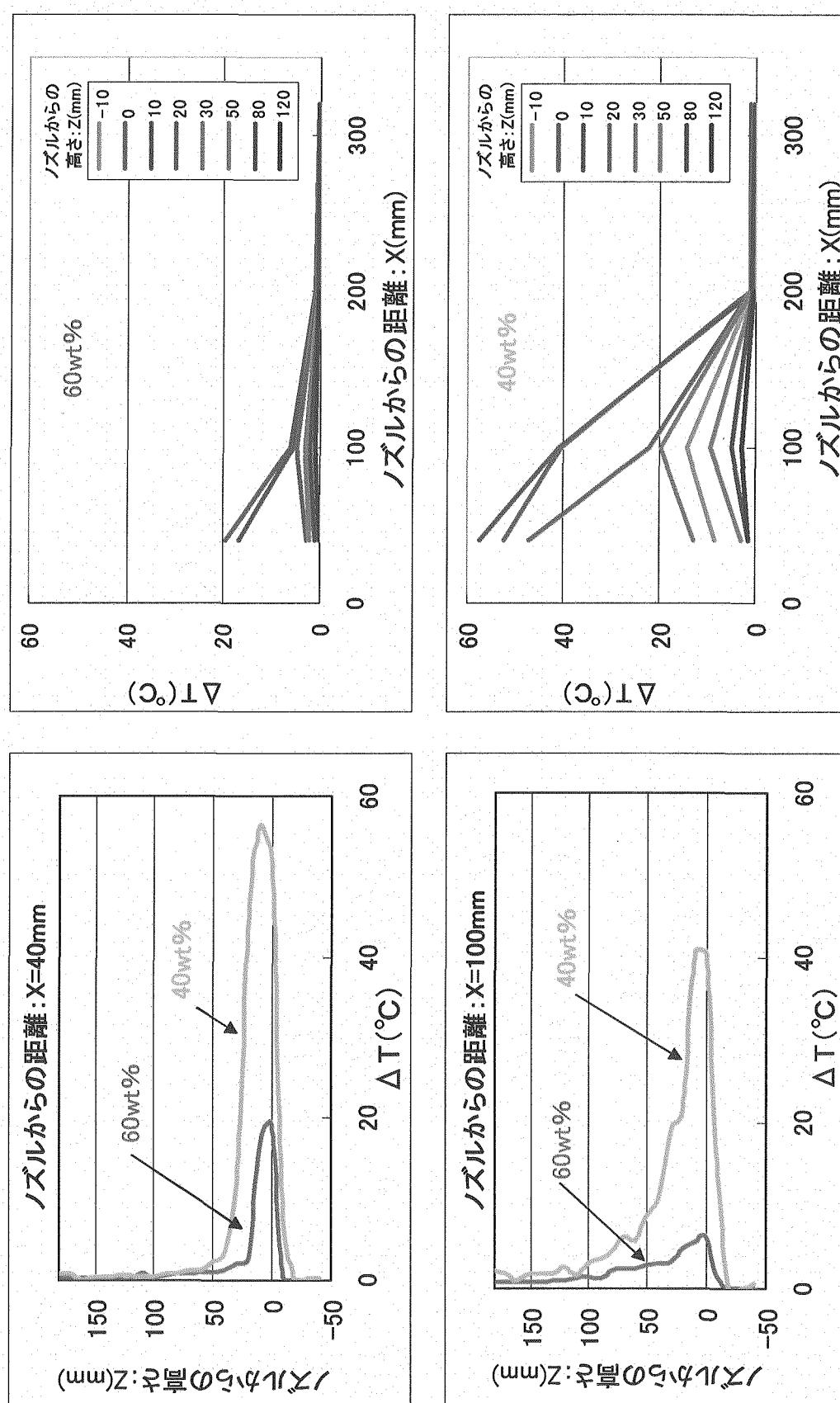


図 3.4-3 鉛直方向および水平方向温度分布(NaOH 濃度の影響)

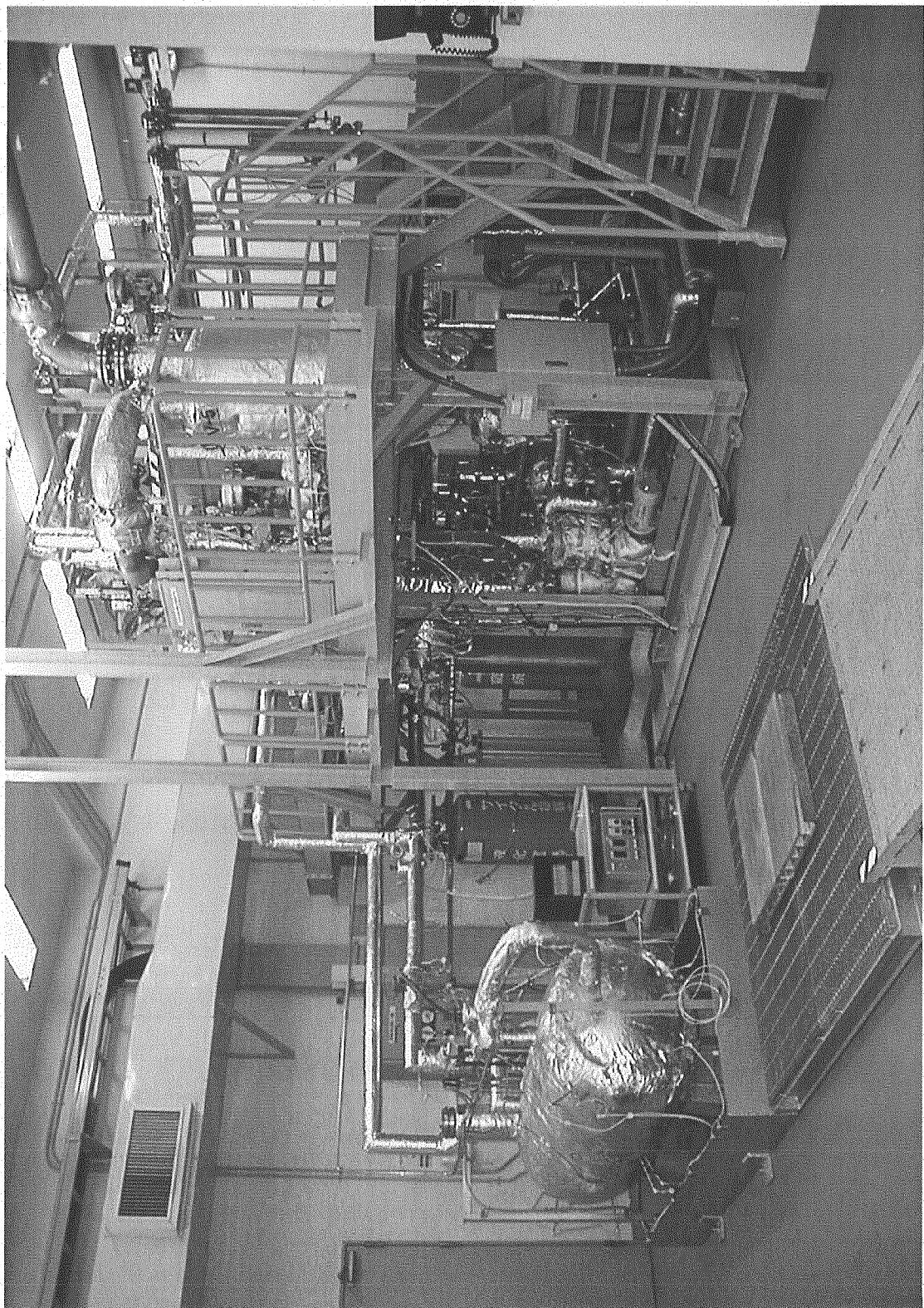


写真 2.1-1 ナトリウム転換基礎試験装置外観

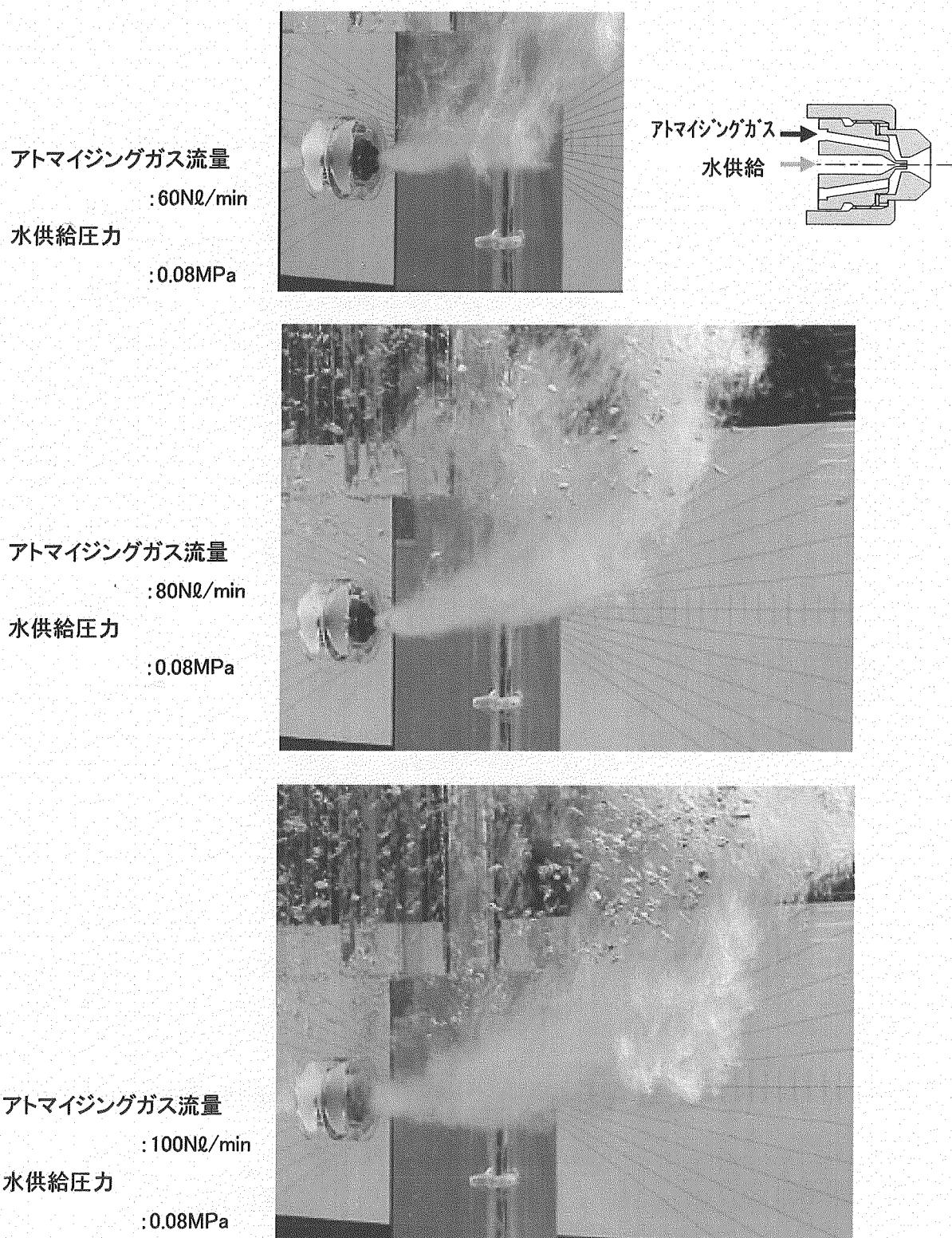


写真4.1-1 Na注入ノズルの水中可視化試験

(水注入と圧縮空気アトマイジングの状況)

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

| 基本量 | SI 基本単位 | |
|---------------------------|--------------------------------|-------------------|
| | 名称 | 記号 |
| 長 質 時 間 電 流 热力学温度 物 質 光 度 | メートル キログラム 秒 アンペア ケルビン モル カンデラ | m kg s A K mol cd |

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量 | SI 基本単位 | |
|-----------------|---------------------|-------------------------|
| | 名称 | 記号 |
| 面 体 速 度 加 速 波 数 | 積 平 方 積 立 法 メ 一 ト ル | m^2 |
| 電 気 測 度 | 度 メ 一 ト ル 每 秒 | m^3 |
| 熱 力 学 温 度 | 度 メ 一 ト ル 每 秒 每 秒 | m/s |
| 物 質 量 | 度 メ 一 ト ル 每 秒 每 秒 | m/s^2 |
| 光 度 | 度 メ 一 ト ル 每 秒 每 秒 | m^{-1} |
| 密度 (質量密度) | キログラム每立法メートル | kg/m^3 |
| 質量体積 (比体積) | 立法メートル毎キログラム | m^3/kg |
| 電 流 密 度 | アンペア毎平方メートル | A/m^2 |
| 磁 界 の 強 度 | アンペア毎メートル | A/m |
| (物質量) 濃 度 | モル毎立方メートル | mol/m^3 |
| 輝 度 | カンデラ毎平方メートル | cd/m^2 |
| 屈 折 率 (数の) | 1 | 1 |

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

| 組立量 | SI 組立単位 | | |
|--|-----------------------|-------------------|--|
| | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表し方 |
| 平 周 面 角 | ラジアン ^(a) | rad | $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}=1^{(b)}$ |
| 立 体 波 数 | ステラジアン ^(a) | sr ^(c) | $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}=1^{(b)}$ |
| 周 波 力 | ヘルツ | Hz | s^{-1} |
| 圧 力 , 応 力 | ニュートン | N | $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | パスカル | Pa | N/m^2 |
| 工 率 , 放 射 束 | ワット | W | $\text{N} \cdot \text{m}$ |
| 電 荷 , 電 気 量 | クーロン | C | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ |
| 電位差 (電圧), 起電力 | ボルト | V | J/s |
| 静 電 容 | フアラード | F | C/V |
| 電 気 抵 抗 | オーム | Ω | V/A |
| コンダクタンス | シemens | S | A/V |
| 磁 東 束 | ウエーバー | Wb | $\text{V} \cdot \text{s}$ |
| 磁 東 密 度 | テスラ | T | Wb/m^2 |
| インダクタンス | ヘンリイ | H | Wb/A |
| セルシウス温度 | セルシウス度 ^(d) | °C | K |
| 光 照 度 | ルクス | lx | $\text{cd} \cdot \text{sr}^{(e)}$ |
| (放射性核種の) 放射能吸収線量, 質量エネルギー一分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量 | ベクレル | Bq | lm/m^2 |
| | ギレイ | Gy | J/kg |
| | シーベルト | Sv | J/kg |
| | | | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ |

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表 4 に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号 “1” は示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号 sr を単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度 m°C のように SI 接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

| 組立量 | SI 組立単位 | | |
|--------------------|-------------------|-------------------------|---|
| | 名称 | 記号 | SI 基本単位による表し方 |
| 粘 力 の モ 一 メ ン 度 | パスカル | Pa | $\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| 表 面 張 力 | ニュートンメートル | N | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ |
| 角 速 度 | ラジアン毎秒 | N/m | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ |
| 角 加 速 度 | ラジアン毎平方秒 | rad/s | $\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}=\text{s}^{-1}$ |
| 熱 流 密 度 , 放 射 照 度 | ワット每平方メートル | rad/s ² | $\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}=\text{s}^{-2}$ |
| 熱 容 量 , エントロピー | ワット每平方米メートル | W/m ² | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ |
| 熱 容 量 , エントロピー | ジユール毎ケルビン | J/K | $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ |
| 質 量 热 容 量 (比熱容量) | ジユール毎キログラム | J/kg | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| 質 量 エネルギー (比エネルギー) | ジユール毎キログラム | J/kg | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| 熱 伝 導 率 | ワット每メートル毎ケルビン | W/(m · K) | $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| 体 積 エネルギー | ジユール毎立方メートル | J/m ³ | $\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ |
| 電 界 の 強 度 | ボルト每メートル | V/m | $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$ |
| 体 積 電 荷 | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | $\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$ |
| 電 気 変 位 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | $\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$ |
| 誘 透 磁 率 | ファラド每メートル | F/m | $\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$ |
| モルエネルギー | ヘンリー每メートル | H/m | $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$ |
| モルエンタロピー | ジユール毎モル | J/mol | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| モル熱容量 | ジユール毎モルケル | J/(mol · K) | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| 照射線量 (X 線及びγ線) | クーロン毎キログラム | C/kg | $\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$ |
| 吸 収 線 量 | グレイ毎秒 | Gy/s | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ |
| 放 射 強 度 | ワット每平方メートル | W/sr | $\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}=\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ |
| 放 射 輝 度 | ワット每平方メートル每ステラジアン | W/(m ² · sr) | $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}=\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ |

表 5. SI 接頭語

| 乗数 | 接頭語 | 記号 | 乗数 | 接頭語 | 記号 |
|-----------|-----|----|------------|------|----|
| 10^{24} | ヨーダ | Y | 10^{-1} | デシ | d |
| 10^{21} | ゼタ | Z | 10^{-2} | センチ | c |
| 10^{18} | エクサ | E | 10^{-3} | ミリ | m |
| 10^{15} | ペタ | P | 10^{-6} | マイクロ | μ |
| 10^{12} | テラ | T | 10^{-9} | ナノ | n |
| 10^9 | ギガ | G | 10^{-12} | ピコ | p |
| 10^6 | メガ | M | 10^{-15} | フェムト | f |
| 10^3 | キロ | k | 10^{-18} | アト | a |
| 10^2 | ヘクト | h | 10^{-21} | ゼット | z |
| 10^1 | デカ | da | 10^{-24} | ヨクト | y |

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

| 名称 | 記号 | SI 単位による値 |
|------|-----|---|
| 分 | min | 1 min=60s |
| 時 | h | 1h = 60 min=3600 s |
| 日 | d | 1 d=24 h=86400 s |
| 度 | ° | $1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$ |
| 分 | ' | $1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$ |
| 秒 | " | $1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$ |
| リットル | L | $1 \text{L}=1 \text{dm}^3=10^{-3} \text{m}^3$ |
| トン | t | $1 \text{t}=10^3 \text{ kg}$ |
| ネーベル | Np | $1 \text{Np}=1$ |
| ベル | B | $1 \text{B}=(1/2) \ln 10 (\text{Np})$ |

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さないSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称 | 記号 | SI 単位であらわされる数値 |
|----------|----|---|
| 電子ボルト | eV | $1 \text{eV}=1.6021773(49) \times 10^{-19} \text{J}$ |
| 統一原子質量単位 | u | $1 \text{u}=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{kg}$ |
| 天文単位 | ua | $1 \text{ua}=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{m}$ |

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

| 名称 | 記号 | SI 単位であらわされる数値 |
|----------------|-----|---|
| 海 里 | 里 | 1 海里=1852m |
| ノ ト | ト | 1 ノット=1 海里每時=(1852/3600)m/s |
| ア ー ル | a | $1 \text{a}=1 \text{dam}^2=10^3 \text{m}^2$ |
| ヘ ク タ ー ル | ha | $1 \text{ha}=1 \text{hm}^2=10^4 \text{m}^2$ |
| バ ー ル | bar | $1 \text{bar}=0.1 \text{MPa}=100 \text{kPa}=1000 \text{hPa}=10^5 \text{Pa}$ |
| オ ン グ スト ロ ー ム | Å | $1 \text{\AA}=0.1 \text{nm}=10^{-10} \text{m}$ |
| バ ー ジ ン | b | $1 \text{b}=100 \text{fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$ |

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

| 名称 | 記号 | SI 単位であらわされる数値 |
|-------------|-----|---|
| エ ル グ | erg | $1 \text{erg}=10^{-7} \text{ J}$ |
| ダ イ ヴ | dyn | $1 \text{dyn}=10^{-5} \text{ N}$ |
| ボ ア ブ | P | $1 \text{P}=1 \text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2=0.1 \text{Pa} \cdot \text{s}$ |
| ス ト ー ク | St | $1 \text{St}=1 \text{cm}^2/\text{s}=10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ |
| ガ ウ ス | G | $1 \text{G}=10^{-4} \text{ T}$ |
| エ ル ス テ ッ ド | Oe | $1 \text{Oe}=(1000/4\pi) \text{A}/\text{m}$ |
| マ ク ス ウ ェ ル | Mx | $1 \text{Mx}=10^{-8} \text{ Wb}$ |
| ス チ ル ブ | sb | $1 \text{sb}=1 \text{cd}/\text{cm}^2=10^4 \text{cd}/\text{m}^2$ |
| ホ ル プ | ph | $1 \text{ph}=10^4 \text{ lx}$ |
| ガ ル | Gal | $1 \text{Gal}=1 \text{cm}/\text{s}^2=10^{-2} \text{ m/s}^2$ |

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

| 名称 | 記号 | SI 単位であらわされる数値 |
|---------------|---------|--|
| キ ュ リ ー | Ci | $1 \text{Ci}=3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$ |
| レ ン ト ゲ | R | $1 \text{R}=2.58 \times 10^{-2} \text{C/kg}$ |
| ラ ド | rad | $1 \text{rad}=1 \text{Gy}=10^{-2} \text{Gy}$ |
| レ ム | rem | $1 \text{rem}=1 \text{cSv}=10^{-2} \text{Sv}$ |
| X 線 単 位 | 1X unit | $=1.002 \times 10^{-10} \text{nm}$ |
| ガ ン マ | γ | $1 \gamma=1 \text{nT}=10^{-9} \text{T}$ |
| ジ ャ ン ス キ ー | Jy | $1 \text{Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ |
| フ ェ ル ミ | fermi | $=1 \text{fm}=10^{-15} \text{m}$ |
| メ ト ル 系 カ ラ ト | Torr | $1 \text{metric carat}=200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{kg}$ |
| ト ル | atm | $1 \text{Torr}=(101.325/760) \text{ Pa}$ |
| 標 準 大 気 壓 | 1 atm | $=101.325 \text{ Pa}$ |
| カ ロ リ ー | cal | |
| ミ ク ロ ン | μ | $1 \mu=1 \text{μm}=10^{-6} \text{m}$ |